



CIRAD-FLHOR La Réunion
Pôle Agroalimentaire

INCIDENCE DES CONTRAINTES CULTURALES SUR LE DEVELOPPEMENT ET LE POTENTIEL DE MATURATION DE LA MANGUE

(Mangifera indica L. LIRFA)



Responsables de stage:

Jacques JOAS (CIRAD)
Yannis CARO (CIRAD)
Jean-Louis BRAYER (UTC)
Yollande PERRIN (UTC)

Stagiaire:

Delphine ROBBE
Génie biologique
Printemps 2002

Auteur: Delphine ROBBE

Titre: Incidence des contraintes culturelles sur le développement et le potentiel de maturation de la mangue *Mangifera indica* L. Lirfa.

Institution: CIRAD FLHOR – Pôle Agroalimentaire

Lieu: Ile de la Réunion – Maison Régionale des Sciences et Technologies

St Denis

Stage effectué de mars à août 2002

Encadrant: Jacques JOAS

Résumé Technique

La culture de mangues est en plein essor sur l'île de la Réunion. La préservation des caractéristiques organoleptiques et nutritionnelles des fruits représente un enjeu important tant pour les marchés locaux que pour l'export. L'incidence des contraintes culturelles sur les fruits à la récolte est étudiée afin de relier la qualité initiale acquise au champ à la qualité finale après traitements de conservation.

Dans cette optique, des paramètres agronomiques de stress (disponibilité en assimilats carbonés et fourniture en eau) sont appliqués aux manguiers. La caractérisation biochimique et morphologique des mangues est étudiée pour 12 stades de récolte.

Les mangues bénéficiant d'une disponibilité supérieure en assimilats carbonés sont plus lourdes et moins acides. Ils accumulent plus de saccharose, amidon, et cations mobiles (potassium et magnésium). Les teneurs en acides organiques ne sont pas modifiées par les contraintes culturelles. L'irrigation ne semble pas avoir d'effet sur la composition biochimique de la mangue. L'effet des stress cumulés (forte charge en fruit, non irrigué) a un impact sur le métabolisme des sucres mis en œuvre lors de la maturation et sur la synthèse d'ACC libre (Acide 1-aminocyclopropane-1-carboxylique, précurseur de l'éthylène). Le potentiel de maturation de ces fruits est donc modifié par les conditions culturelles.

Mots clés: Mangue, *Mangifera indica* L. Lirfa, qualité, contraintes culturelles, développement, composition biochimique, potentiel de maturation.

REMERCIEMENTS

Je tiens en tout premier lieu à adresser mes sincères remerciements à **Jacques Joas** pour m'avoir permis de réaliser mon projet de fin d'étude au sein de son département, et pour m'avoir tout au long du stage apporté des conseils scientifiques et techniques, patience et disponibilité.

Je souhaite remercier particulièrement **Yanis Caro** pour sa collaboration scientifique, technique et méthodologique, mais aussi pour sa bonne humeur, sa disponibilité et sa sympathie dont je garderai un très bon souvenir.

Je remercie aussi **Antoine Collignan**, responsable du Pôle Agroalimentaire de son accueil et sa gentillesse.

Ensuite, je tiens à remercier l'ensemble du personnel du CIRAD que ce soit le personnel installé à la Maison Régionale des Sciences et de la Technologie ou celui de la station La Bretagne pour m'avoir conseillé et aidé tout au long du projet.

Plus particulièrement, **Mr Patrick Légier**, **MR Jocelyn Idmond** et **Mr Jean-Dolin Mouny-Latchimy**, du laboratoire d'analyse des sols pour m'avoir accueillie et aidée dès que j'en avais besoin.

Mathieu Lechaudel pour son appui scientifique.

Isabelle Poligné pour ses conseils en tout genre et son amitié sincère.

François Deumier, **Hervé Bernard** et **Elodie Arnaud** pour leur rigueur scientifique et leur amitié.

Les stagiaires: **Gaël Urvoy**, **Julien Carrier**, **Sophie Ferrarris**, **Hélène Basquin**, **Marie Gosme**, **Adrien Monsempès** pour leur gentillesse et leur amitié au travail comme à la case. **Vincent Orange** qui a bien des fois facilité notre vie à la case.

Mes travaux et analyses ayant pris place dans les locaux du CRITT agroalimentaire de La Réunion, je remercie **l'ensemble du personnel du CRITT** pour l'accès aux moyens techniques et leur gentillesse à mon égard.

Merci aussi à **Mr Briantais** directeur de la DGCCRF, ainsi qu'à tout le personnel. En particulier, merci à **Alexin Pajanaye** qui m'a beaucoup appris sur l'HPLC ionique et aussi sur la culture créole, et les randonnées à la Réunion.

Merci à tous ceux que j'ai côtoyés pendant ces 6 mois qui ont rendu mon séjour agréable et mémorable.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	3
PARTIE 1: PRESENTATION DU CIRAD.....	4
1. Présentation générale du CIRAD.....	4
2. Le CIRAD à la Réunion	5
2.1. Présentation.....	5
2.2. Le pôle agroalimentaire.....	7
PARTIE 2: PRESENTATION DU PROJET	8
1. Contexte de l'étude.....	8
2. La qualité.....	8
3. Objectifs du stage	10
PARTIE 3: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	12
1. Origine et développement	12
2. Description, utilisations.....	12
2.1. Taxonomie et description botanique.....	13
2.2. Consommation et utilisation de la mangue.....	13
2.3. Cultivars.....	14
2.4. Les principales caractéristiques.....	15
3. Evolution physiologique et biochimique de la mangue pendant son développement.....	16
3.1. Cycle de croissance.....	16
3.2. Développement morphologique de la mangue.....	17
3.3. Biochimie et évolution biochimique de la mangue.....	17
3.4. Circulation des nutriments dans les végétaux.....	23
3.5. Physiologie du mûrissement.....	24
PARTIE 4: MATERIEL ET METHODES	28
1. Echantillonnage	28
2. Conditions expérimentales.....	28
3. Récolte et préparation des échantillons.....	29
4. Organisation du travail.....	29
5. Mesures morphologiques et analyses physico-chimiques classiques.....	30
5.1. Mesures morphologiques.....	30
5.2. Préparation des échantillons.....	30
5.3. Matière sèche	30
5.4. ESS.....	31
5.5. PH et acidité titrable.....	31
6. Cations.....	31
6.1. Extraction des cations de la pulpe de mangue.....	31
6.2. Dosage des cations	32
6.3. Expression des résultats	33
7. Sucres.....	33
7.1. Mise au point de la méthode d'extraction des sucres	33
7.2. Protocoles d'extraction et de dosage des sucres.....	35
7.3. Expression des résultats.....	37
8. Protocoles d'extraction et de dosage des acides organiques.....	38
8.1. Extraction des acides organiques de la pulpe de mangue.....	38

8.2. Dosages des acides organiques.....	38
8.3. Expression des résultats.....	40
9. Protocoles d'extraction et de dosage de l'amidon.....	40
9.1. Extraction de l'amidon.....	40
9.2. Dosage du glucose par kit enzymatique.....	41
9.3. Expression des résultats.....	41
10. Protocoles d'extraction et de dosage de l'ACC.....	41
10.1. Extraction de l'ACC libre.....	41
10.2. Extraction de l'ACC total.....	42
10.3. Dosage de l'ACC.....	42

PARTIE 5: RESULTATS ET DISCUSSIONS.....44

1. Croissance morphologique des fruits.....	44
1.1. Résultats	44
1.2. Discussions.....	44
2. Evolution du taux de matière sèche.....	45
2.1. Résultats	45
2.2. Discussions	45
3. Teneurs en glucides	46
3.1. ESS	46
3.2. Sucres majeurs.....	47
3.3. Amidon.....	48
3.4. Discussion.....	49
4. pH, Acidité titrable, teneur en acides organiques.....	50
4.1. pH.....	50
4.2. Acidité titrable.....	51
4.3. Acides organiques.....	52
4.4. Discussion.....	54
5. Teneurs en minéraux.....	55
5.1. Le potassium.....	55
5.2. L'ammoniac, le calcium, le sodium et le magnésium.....	56
5.3. Discussion.....	57
6. L'ACC.....	57
6.1. Dosage de l'ACC	57
6.2. Discussion.....	59
7. Discussion générale de l'étude	60
7.1. Effets des traitements.....	60
7.2. La maturation.....	60
7.3. Perspectives des recherches.....	61

CONCLUSION.....62

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXES

INTRODUCTION

La préservation des caractéristiques organoleptiques et nutritionnelles qui définissent la qualité d'un fruit suppose une bonne maîtrise des conditions de commercialisation, tant pour les marchés locaux que pour les marchés exports.

En outre, les fruits tropicaux sont de plus en plus présents sur les marchés européens, compte tenu de leur succès croissant auprès des consommateurs.

Dans ce contexte, la culture de la mangue est en plein essor sur l'île de La Réunion, et les travaux de recherche du CIRAD sont axés :

- ✓ Sur l'élaboration et l'amélioration de la qualité des fruits au champ, avant la récolte.
- ✓ Sur l'utilisation des techniques de conservation et l'étude de leur impact sur la durée de vie et la qualité des mangues, en fonction des stades de récolte.

L'objectif est d'étudier l'incidence des conditions de production sur la qualité des fruits.

1 PRESENTATION GENERALE DU CIRAD

Le sigle CIRAD se décrypte de la manière suivante : Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement.

Le CIRAD est un organisme scientifique français spécialisé en recherche agronomique appliquée aux régions chaudes. Il a pour mission de contribuer au développement agricole des pays tropicaux et subtropicaux par des recherches, des réalisations expérimentales, des actions de formation et de l'information scientifique et technique en France et à l'étranger. Ses activités recouvrent les domaines des sciences agronomiques, vétérinaires, forestières et agroalimentaires.

Le champ d'action du CIRAD est important puisqu'il couvre plus de 90 pays d'Afrique, d'Asie, du Pacifique, d'Amérique Latine et d'Europe. Les chercheurs du CIRAD sont répartis dans 50 pays et travaillent au sein de structures nationales de recherche ou en appui à des opérations de développement. Le CIRAD dispose aussi d'un dispositif de recherche important, basé en France :

- à Montpellier, en région parisienne et en Corse,
- en France de l'outre-mer : Guadeloupe, Martinique, Guyane, Réunion, Mayotte, Nouvelle Calédonie, Polynésie française.

L'effectif du CIRAD est d'environ 1800 personnes dont 900 cadres. Son budget annuel est de 1 milliard de francs.

Le CIRAD s'organise autour de 28 programmes répartis dans 7 départements qui sont :

- Cirad-ca : cultures annuelles
- Cirad-cp : cultures pérennes
- **Cirad-flhor : productions fruitières, légumières et horticoles**
- Cirad-emvt : élevage et médecine vétérinaire.
- Cirad-forêt : forêts
- Cirad-tera : territoires, environnement et acteurs
- Cirad-amis : amélioration des méthodes pour l'innovation scientifique.

dont les programmes sont :

- **Agroalimentaire**
- Agronomie
- Biotechnologie et ressources génétiques végétales (Biotrop)
- Economie, politique et marchés (Ecopol)
- Modélisation des plantes (Amap)
- Protection des cultures

2 LE CIRAD A LA REUNION

2.1. Présentation

En 2001, le CIRAD regroupe un effectif de 168 agents, dont 52 cadres, 54 techniciens, 62 collaborateurs, auxquels viennent s'ajouter 22 VAT et thésards, ainsi que 80 stagiaires.

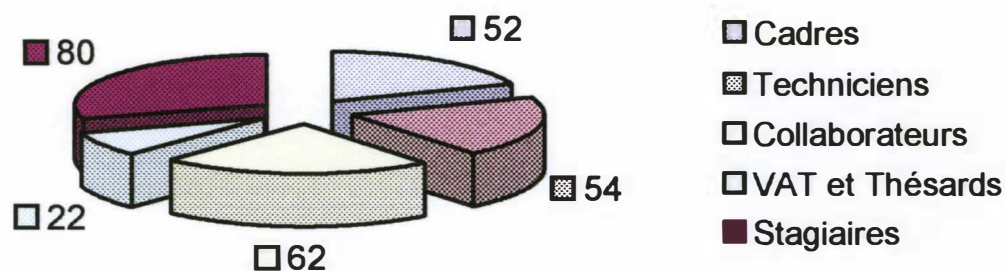


Figure 1 : Effectifs et répartition par type.

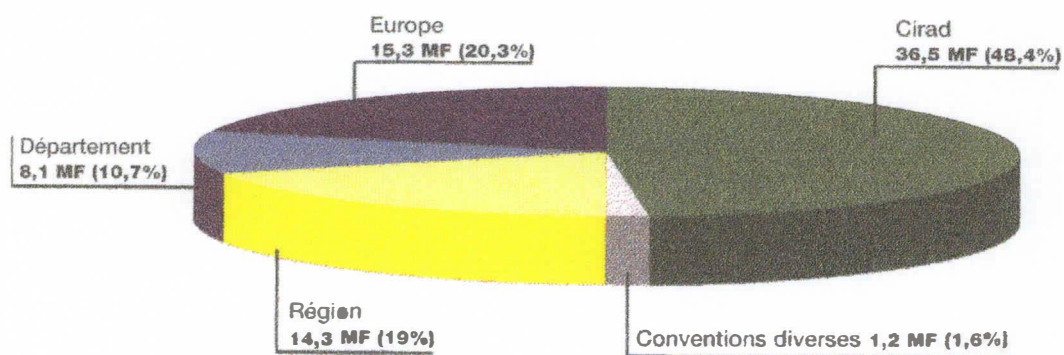


Figure 2 : Financements du CIRAD-Réunion.

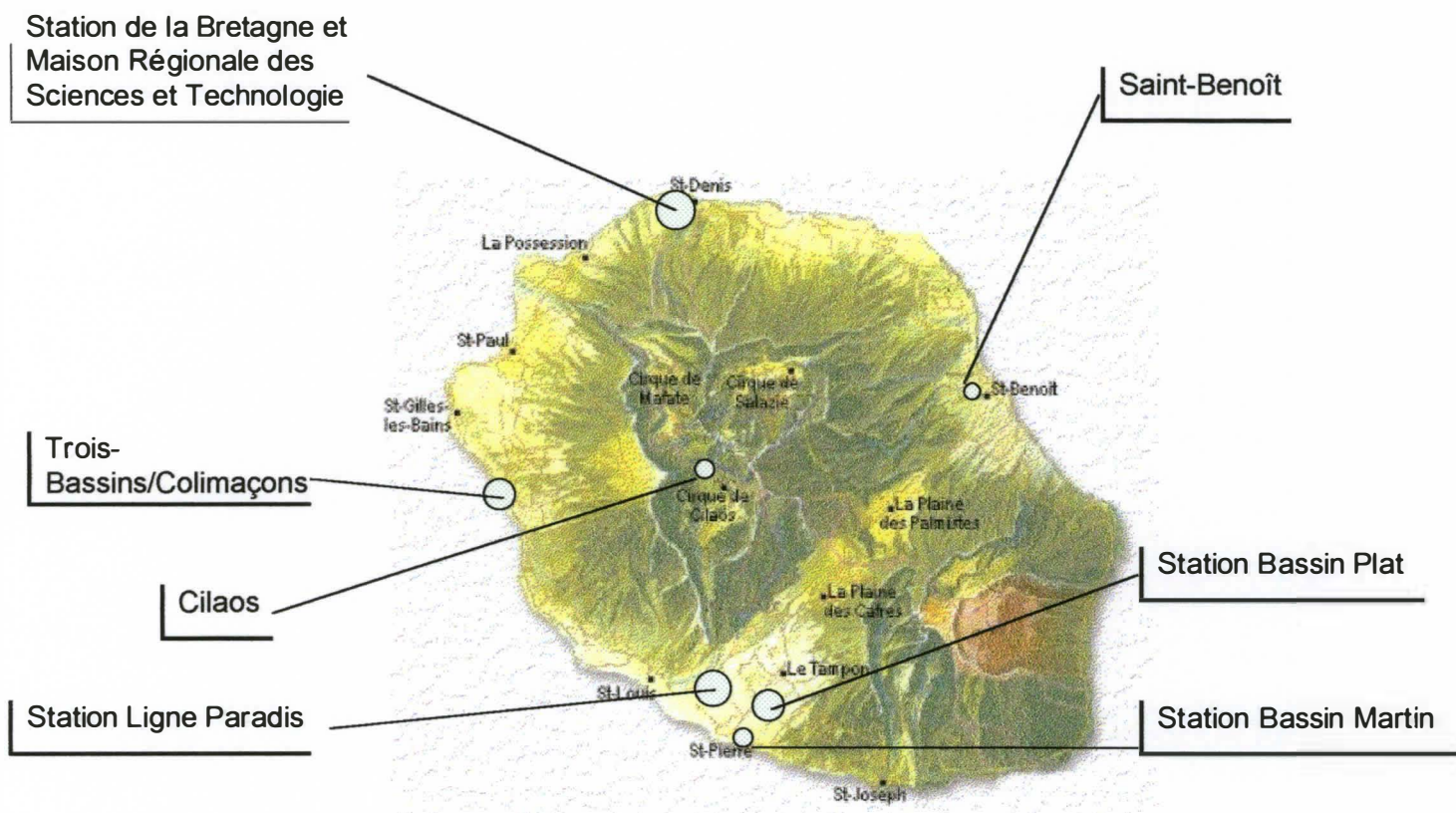


Figure 3 : Implantation du CIRAD à la Réunion.

La figure 2 représente la répartition des financements entre le CIRAD et ses partenaires du Conseil Général et du Conseil Régional. En 2001, le total des ressources du CIRAD-Réunion était de 64,5 MF.

Les activités du CIRAD Réunion sont structurées en 6 pôles de compétences :

- *canne à sucre* : amélioration de la production des zones cannières, amélioration des techniques culturales, modèles de fonctionnement biophysique et outils de diagnostic.
- *fruits, légumes et plantes aromatiques* : amélioration de la production de fruits, amélioration des cultures maraîchères, amélioration des plantes aromatiques.
- *agriculture durable, environnement et forêt* : systèmes sous couvertures végétales et diversification végétale, gestion des exploitations, des organisations et des territoires, gestion des déchets organiques, végétation ligneuse et paysages.
- *élevage* : production et gestion des ressources fourragères, valorisation des ressources alimentaires dans les systèmes d'élevage laitier, étude des facteurs de risque de l'infertilité en élevage bovins laitiers.
- *agroalimentaire* : transformation des produits carnés (viande, produits de la pêche et de l'aquaculture), valorisation des productions végétales.

2.2. Le pôle agroalimentaire.

L'industrie agroalimentaire réunionnaise doit, à l'heure actuelle, répondre à une double nécessité : mieux valoriser les matières premières agricoles pour les marchés locaux et prendre en compte la qualité totale pour affronter la concurrence sur les marchés internationaux. Pour cela, l'acquisition et la reconnaissance d'une expertise forte dans ce domaine porteur à la Réunion sont nécessaires et dépendent de la coexistence d'une formation et d'une recherche de qualité, indispensables pour le développement local et régional. La partie agroalimentaire du CIRAD-Réunion s'est implantée à la MRST (Maison Régionale des Sciences et de la Technologie) et a signé en 1994 un accord avec l'Université et la Chambre de Commerce et d'Industrie de la Réunion afin d'engager des collaborations fortes sur ce thème.

Les deux projets du pôle agroalimentaire sont les suivants :

➤ Transformation des produits carnés :

- Etude et amélioration du procédé de fabrication de boucané à la Réunion,
- Validation d'une unité artisanale de salage séchage fumage à froid de poissons,
- Développement de collaborations au niveau régional sur la transformation des produits animaux.

➤ Valorisation des productions végétales :

- **Caractérisation et aptitude à la conservation.**
- **Conservation des produits en post-récolte.**

1 CONTEXTE DE L'ETUDE

La culture de mangues s'est fortement développée dans l'Océan indien et en Asie du sud-est, où sont localisés les trois quarts de la production mondiale. Avec l'augmentation constante de la production réunionnaise de mangues, certains producteurs s'orientent aujourd'hui vers de nouvelles voies de commercialisation, comme l'utilisation du stockage temporaire pour réguler le marché local ou la filière exportation. Celles-ci exigent alors une meilleure maîtrise de l'approvisionnement, de la durée de vie et une meilleure caractérisation de la qualité des fruits. A La Réunion, la maîtrise de la qualité des mangues représente un enjeu important pour la poursuite du développement de cette production.

Dans cette optique, le CIRAD a mis en place au sein du département FLHOR un programme de recherche sur le manguier à la Réunion, portant sur l'amélioration de la production et la valorisation du fruit.

Des travaux sont menés à la Réunion:

- ✓ Par l'équipe du Pôle Fruits, Maraîchages et plantes Aromatiques située à Saint Pierre sur l'architecture de l'arbre, l'état hydrique de la plante et la qualité des fruits.
- ✓ Par l'équipe du Pôle AgroAlimentaire situé à Saint Denis sur la caractérisation biochimique de la mangue et son aptitude à la conservation.

2 LA QUALITE

La notion de qualité d'un fruit varie suivant que l'on s'adresse au producteur, au distributeur ou au consommateur.

Pour le producteur, la qualité est souvent synonyme de calibre, de précocité et de résistance aux maladies. Le distributeur caractérise la qualité du produit selon sa durée de vie, l'homogénéité des lots de fruits et leur bonne tenue en conservation et durant les transports.

Enfin pour le consommateur, la qualité est plutôt liée à l'aspect extérieur, le bon goût et la valeur nutritionnelle du fruit.

Depuis plusieurs années, les professionnels des filières fruitières confèrent à la qualité un statut privilégié. Ils sont intéressés par une caractérisation plus complète de cette qualité, qui ne se limiterait pas aux critères dits d'attractivité, comme le calibre et la coloration. Cette démarche fait suite à un mécontentement accru des consommateurs qui s'élèvent entre autre contre une dégradation de la qualité gustative des fruits.

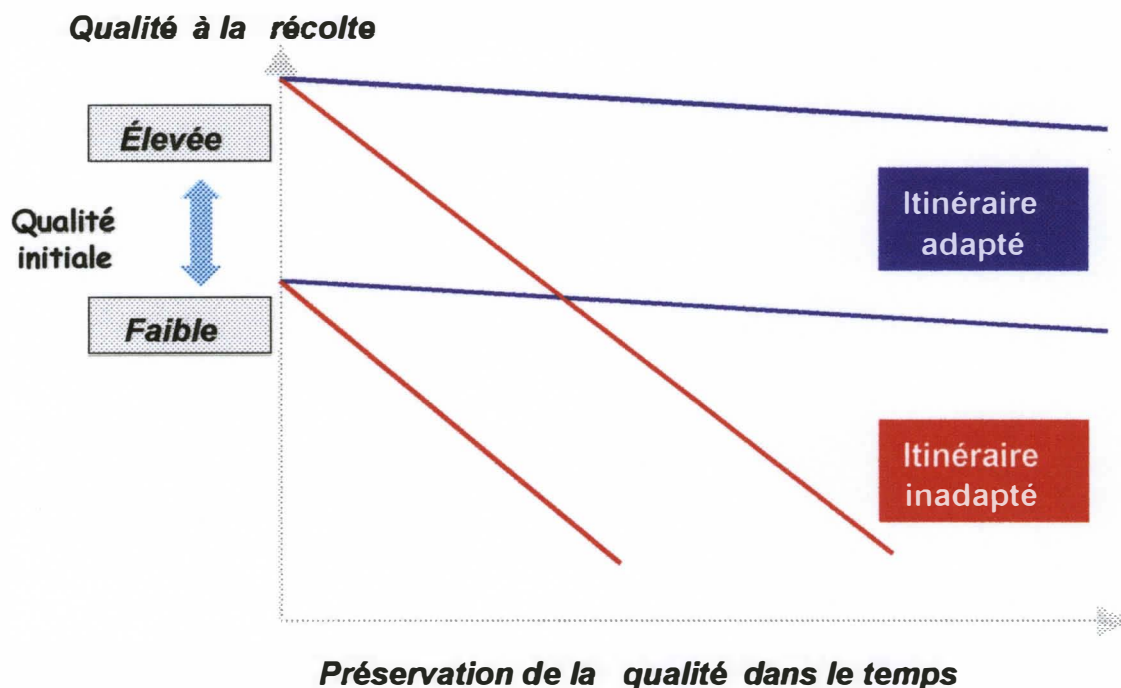
Obtenir et maintenir des niveaux de qualité satisfaisants impliquent une connaissance et une maîtrise de tous les stades, de la production à la conservation des fruits jusqu'à la distribution. D'où l'intérêt de coupler les démarches agronomiques et post-récolte.

Chez le manguier, il existe une variabilité importante de la production et de la qualité des fruits au sein d'un même arbre. Il y a notamment une forte hétérogénéité de la maturité des

fruits dans l'arbre. Cette variabilité est préoccupante: elle oblige le producteur à récolter les fruits en plusieurs passages et à réaliser un tri sévère pour commercialiser des produits homogènes.

La variabilité de la qualité et du calibre semble fortement liée à celle de la croissance du fruit. Le processus de croissance et les phénomènes impliqués dans l'élaboration de la qualité doivent être bien compris avant d'envisager une maîtrise au champ de la qualité organoleptique (cf. figure 4).

Figure 4: Relation entre qualité et commercialisation du champ au consommateur



La qualité est acquise au champ, elle peut être préservée ou détruite selon l'itinéraire technique post récolte.

La qualité commerciale fait référence:

- ✓ Au potentiel de conservation.
- ✓ A l'esthétique.
- ✓ A l'intégrité sanitaire.
- ✓ Aux aspects organoleptiques.

La qualité pour la transformation fait référence:

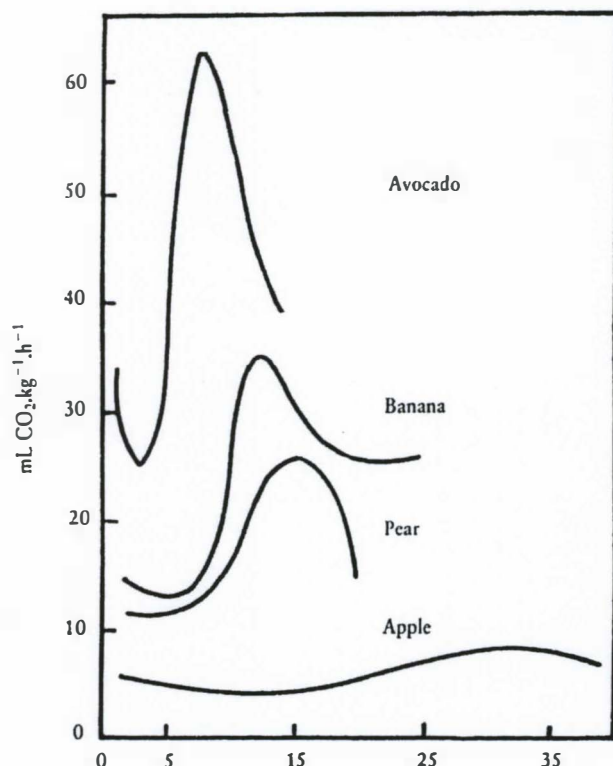
- ✓ A l'aptitude technologique.
- ✓ Aux aspects organoleptiques.

Ces critères et impératifs sont rarement réunis dans un même produit.

La mangue fait partie des fruits climactériques, dont l'entrée en maturation est rapide et caractérisée par hausse brutale du dégagement de dioxyde de carbone associée à une production d'éthylène (cf. figure 5).

Cette entrée en maturation rapide oblige à récolter les fruits avant maturité de consommation afin de disposer d'un délai de commercialisation suffisant.

Figure 5: Exemple d'activité respiratoire de quelques fruits stockés à 15°C durant 40 jours (d'après Biale cité par salunkhe, Bolin et Reddy, 1991)



Nous voyons donc que de nombreux facteurs sont importants dans la maîtrise de la qualité des fruits jusqu'au consommateur. Il est donc intéressant de comprendre et de connaître le processus de croissance du fruit pour expliquer ces variations, et pour homogénéiser au mieux la qualité de la production des mangues à la Réunion.

3 OBJECTIFS DU STAGE

Ce projet se place en aval d'un travail de thèse engagé par le CIRAD. L'objectif de cette thèse est de mieux comprendre, à l'aide d'une approche écophysiological, quels sont les mécanismes impliqués dans la croissance et l'élaboration de la qualité organoleptique des fruits chez le manguier (Mathieu Lechaudel cf. références bibliographiques). Elle doit permettre d'expliquer notamment en se basant sur les concepts de sources et de puits, la variabilité de la croissance des mangues qui est observée au champ et qui semble conditionner leur qualité organoleptique.

Des observations sont en cours pour étudier les relations entre les différents stades de développement de la mangue, la fourniture en assimilats et l'alimentation hydrique du fruit. Au PAA, les mangues sont analysées afin d'étudier leur composition biochimique en fonction des différentes situations agronomiques.

Par ailleurs, un travail de recherche est mis en place concernant les processus biologiques qui déterminent l'évolution du dégagement d'éthylène au cours de la maturation du fruit. L'objectif est de relier les mécanismes physiologiques impliqués dans la maturation au développement du fruit et aux facteurs environnementaux.

Cette étude complète et précise les observations réalisées en 2001. Lors des prochaines saisons de production, les relations entre les potentiels de maturation du fruit, les techniques de conservation et la qualité finale du fruit seront plus particulièrement analysées.

L'originalité de cette étude est qu'elle se place en charnière des deux approches agroalimentaire et agronomique de qualité de la mangue, en intégrant la notion de connaissance de la qualité initiale du fruit dans une optique de conservation. En effet les expériences de conservation se font très souvent sur des fruits dont les caractéristiques initiales ne sont pas déterminées. Or il devient de plus en plus évident que la conservation ne doit pas être considérée comme une opération unitaire, mais comme partie intégrante du processus de production.

1 ORIGINE ET DEVELOPPEMENT:

La mangue, appelée par certains "le roi des fruits orientaux", est originaire de l'Inde où l'on pense que l'arbre est cultivé depuis 4 000 ans. De l'Inde, le manguier s'est répandu dans beaucoup de pays tropicaux et sous-tropicaux à partir du VII^{ème} siècle: Chine, Turquie, Portugal, Madagascar, Réunion, Maurice, Afrique du Sud, Philippines, Hawaii, Jamaïque, Saint-Domingue, Cuba, Floride, Australie, etc.

Les zones de cultures sont localisées entre le tropique du Cancer au Nord et le tropique du Capricorne au Sud. Elles concernent essentiellement l'Asie qui représente potentiellement près de 80% de la production mondiale. En dehors de cette zone, il existe d'autres pays producteurs importants en Amérique (Mexique, Brésil, Pérou), et en Afrique (Nigeria, Tanzanie)

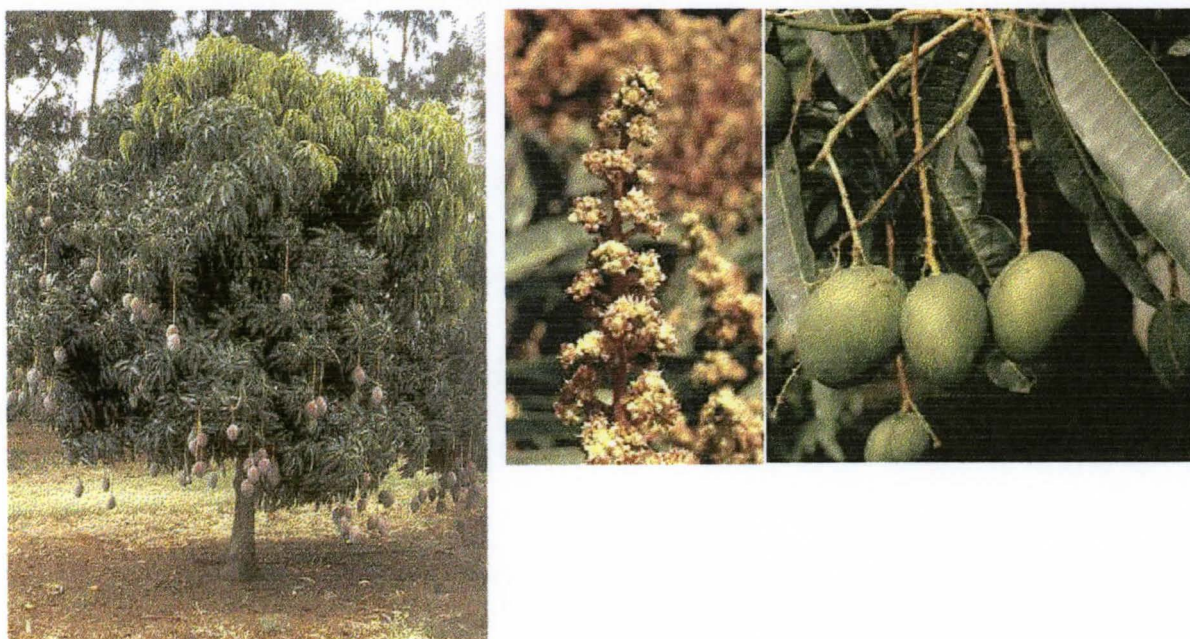
2 DESCRIPTION, UTILISATIONS.

2.1. Taxonomie et description botanique

Le manguier appartient à la famille des Anacardiaceées (cf. figure 6). Cette famille contient 73 genres; le genre *Mangifera* comprend 69 espèces, mais la majorité des fruits consommés appartient à l'espèce *Mangifera indica*.

Le manguier est un arbre fruitier de taille moyenne (10 à 40 mètres), à écorce lisse d'un gris-brun foncé ayant tendance à noircir, et légèrement fissuré. Il a un feuillage à odeur de térébenthine, persistant coriace, alterne et lancéolé. Sa canopée est ronde et symétrique, plus ou moins dense. Les espèces se développent dans les zones de basse altitude (inférieure à 300 mètres au-dessus du niveau de la mer), bien que certaines apparaissent à des altitudes de 600 à 1900 mètres.

Figure 6: Manguier, fleurs et fruits du manguier. (source : Images de la recherche, CIRAD, 1999)

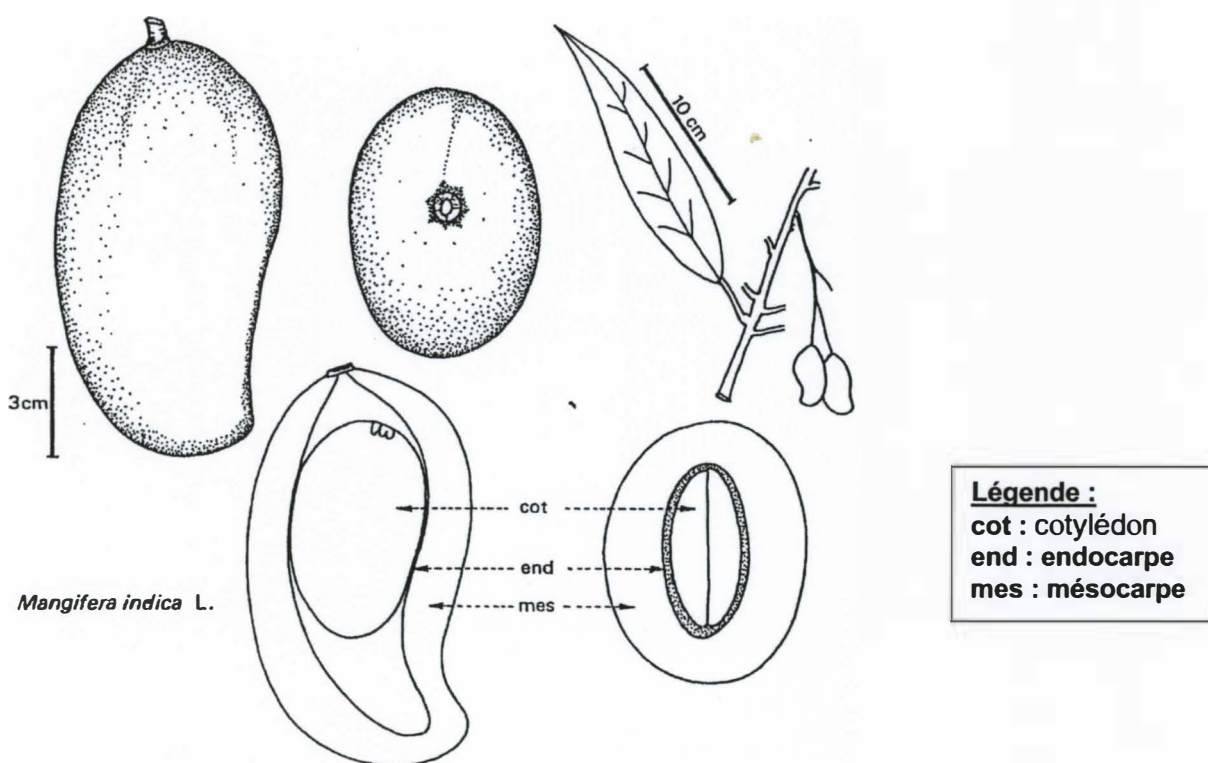


La croissance du manguier est rapide, avec un emplacement au soleil et à l'abri du vent, dans un sol profond et riche. La multiplication a lieu par semis de graines fraîches, après avoir enlevé la cosse.

La floraison a lieu après la saison sèche, sur des arbres ayant 3 à 6 ans. Les fruits et les fleurs se développent sous forme d'inflorescences terminales (cf. figure 6).

La mangue est un fruit à mésocarpe charnu, contenant un seul noyau central (cf. figure 7). La taille des mangues varie selon les variétés de 2.5 à 30 cm. Les fruits sont parfumés et paniculés. Ils ont une peau cireuse, lisse, jaune verdâtre à rouge orangé. La chair est jaune orangée et peut être variablement fibreuse. La forme caractéristique de la mangue est due à la formation d'une pointe à l'extrémité inférieure du fruit appelé bec.

Figure 7: Morphologie structurale de la mangue (d'après C.Trisonthi, 1992)



2.2. Consommation et utilisation de la mangue

La mangue est consommée fraîche ou séchée en lamelles. Elle est utilisée dans la confection de jus de fruit, sirops, boissons alcoolisées, confitures, desserts, glaces, chutney. Elle peut aussi être servie en accompagnement de viandes blanches.

Elle est aussi utilisée en médecine traditionnelle dans de nombreux pays, comme vermifuge. Le manguier a aussi des propriétés diurétiques et laxatives. Il traite l'hypertension artérielle. Les feuilles du manguier sont indiquées pour le traitement des maladies respiratoires (l'asthme, la bronchite). Le noyau est utilisé pour traiter les coliques, diarrhées et dysenteries. La décoction d'écorce traite les affections buccales ainsi que les hémorroïdes. La sève est utilisée comme colle à papier en Afrique. Le bois est utilisé en ébénisterie et est commercialisé sous le nom de machang ou sebam.

2.3. Cultivars

Il existe plus de 1000 variétés ou cultivars (cf. figure 8). Seulement une centaine présente un intérêt commercial. Les différents cultivars sont sélectionnés par greffage et hybridation selon leur résistance et la qualité des fruits obtenus.

Les mangues représentent plus de 9.5 millions de tonnes métriques par an de fruits produits.

La variété utilisée pour l'étude est le cultivar Lirfa:

- origine: Pine Island, Florida, 1943.
- Fruit: de taille moyenne, forme ronde à oblique, couleur orange avec des taches rouges, sans fibres.
- Variété très précoce.
- Résistance à l'anthracnose.
- Adapté aux régions côtières.

Figure 8: Principaux cultivars dans le monde (d'après S.Lalshminarayana, 1980).

TABLE 4.2. PRINCIPAL MANGO CULTIVARS OF THE WORLD¹

Country	Pulpy Cultivars	Juicy Cultivars
India	Alphonso, Bangalora, Banganapalli, Bombai, Bombay green, Chausa, Cherukurasam, Cowasjipatel, Dashehari, Fajri, Fajri Zafrani, Fazli malda, Fernandian, Gulab Khas, Himsagar, Imran pasand, Jehangir, Kalepad, Khas-ul-khas, Kishenbhog, Langra, Mankurad, Mark-e-ara, Mulgoa, Mundappa, Neelum, Olour, Pairi, Panchadarakalasa, Rajapuri, Raneepasand, Raspuri, Rataul, Rumani, Safdar pasand, Safeda Malihabad, Samarbahisht chow-sa, Sehroli, Shah pasand, Suvarnarekha, Zardulu	Begrain, Cherukurasam, Mithwa Ghazipur, Nauras, Peddarasam, Rasgola, Raspoonia, Sharbathi, Sunder-shah, Taimuriya
Pakistan	Sindhri and several Indian cultivars	
Philippines	Carabao, Pico	
Africa	Boribo, Ngowe, Apple, Malindi, Mabroka	
Israel	Nimrod and some Florida cultivars	
Australia	Kensington	
Florida	Adams, Alice, Anderson, Brooks, Cambodi-ana, Carrie, Cecil, Davis Haden, Dixon, Early gold, Edward, Eldon, Fascell, Flori-gon, Fragrance, Gibbons, Glenn, Golden Brooks, Haden, Heinlein, Herman, Irwin, Jacquelin, Keitt, Kent, Lippens, Lucille, Palmer, Pettigrew, Ruby, Saigon, Samini, Sensation, Simmonds, Smith, Springfels, Strothman, Sunset, Tommy Atkins, Van Dyke	Julie, Zill
Hawaii	Pope, Edwards, Buchanan, Joe Welsch, Kens-ington, Gouveia, Waterhouse, Momi K.	
Trinidad		Julie
Mexico	Ataulfo, Diplomatico, Esmeralda, Haden, Irwin, Keitt, Kent, Manila, Manzana, Na-ranja, Oro, Piña canario, Sensation, Tommy Atkins	Julie, Zill

Source: Singh (1968); ICAR (1967); Ruehle and Ledin (1965); Lakshminarayana et al. (1975A); Campbell and Malo (1967); Brekke et al. (1975); Cheema et al. (1954).

¹ Names of cultivars from other mango-growing countries are not available.

2.4. Les principales caractéristiques

D'après Nirmal Ramburn et Gérard de Fontenay (Prosi, Diversification agricole, janvier 2000), les principaux constituants de la mangue sont l'eau, les glucides, protides, lipides, minéraux, pigments, tannins et vitamines (cf. figure 9).

Avec un apport énergétique de 60 kilocalories (251 kiloJoules) aux 100 g, la mangue fait partie des fruits moyennement caloriques : elle se situe entre la pomme et la cerise.

Cette valeur énergétique dépend largement des glucides (ou sucres) du fruit. Le taux de glucides dépend aussi de la variété : les mangues originaires d'Afrique semblent en général un peu plus riches en glucides que celles provenant d'Amérique.

Protides et lipides sont bien sûr très peu abondants, comme dans la plupart des fruits frais

Les acides organiques, qui interviennent avec les sucres dans l'équilibre de la saveur, restent assez peu abondants.

Les substances aromatiques et odorantes de la mangue sont abondantes et complexes. Elles appartiennent aux groupes des aldéhydes, des esters et des alcools-esters volatiles. Elles atteignent leur optimum lorsque le fruit est à pleine maturité. Elles confèrent à la mangue sa saveur très typée, rappelant à la fois l'abricot, l'ananas, la pêche, la rose, avec une légère touche de figue.

Différents pigments donnent à la pulpe du fruit sa couleur jaune orangé plus ou moins foncé : les xanthophylles (pigments jaunes), les anthocyanes (pigments rouges et violacés), les flavonols (pigments jaunes), les caroténoïdes (pigments jaunes et orangés). Certains de ces pigments possèdent des propriétés vitaminiques : anthocyanes et flavonols ont des propriétés "vitamine P", certains caroténoïdes constituent la provitamine A.

Deux vitamines sont présentes en quantités importantes : la provitamine A et la vitamine C.

Les minéraux sont moyennement abondants, bien diversifiés, et largement dominés par le potassium.

Dans la mangue, le taux des fibres est plus ou moins important (en moyenne 1,9 g pour 100g). Il s'agit pour l'essentiel de cellulose, qui constitue les membranes des cellules végétales, ainsi que les fibres qui prolongent le noyau et l'insèrent étroitement dans la pulpe. Par sélection, on a pu obtenir aujourd'hui des mangues dans lesquelles ces prolongations fibreuses sont beaucoup plus discrètes que dans les variétés d'origine

Figure 9: Valeurs nutritionnelles de mangue indienne (Gopalan et al. 1971)

<i>Composant</i>	<i>Quantité pour 100 g</i>	<i>Composant</i>	<i>Quantité pour 100 g</i>
Portion consommable	74 g	Sodium	26.0 mg
Eau	81 g	Potassium	205.0 mg
Protides	0.6 g	magnésium	27.0 g
Lipides	0.4 g	Carotène	2743.0 µg
Glucides	16.9 g	Thiamine	0.08 mg
Fibres	0.7 g	Riboflavine	0.09 mg
Calcium	14.0 mg	Niacine	0.9 mg
Phosphore	16.0 mg	Vitamine C	16.0 mg
Fer	1.3 mg		

3 EVOLUTION PHYSIOLOGIQUE ET BIOCHIMIQUE DE LA MANGUE PENDANT SON DEVELOPPEMENT

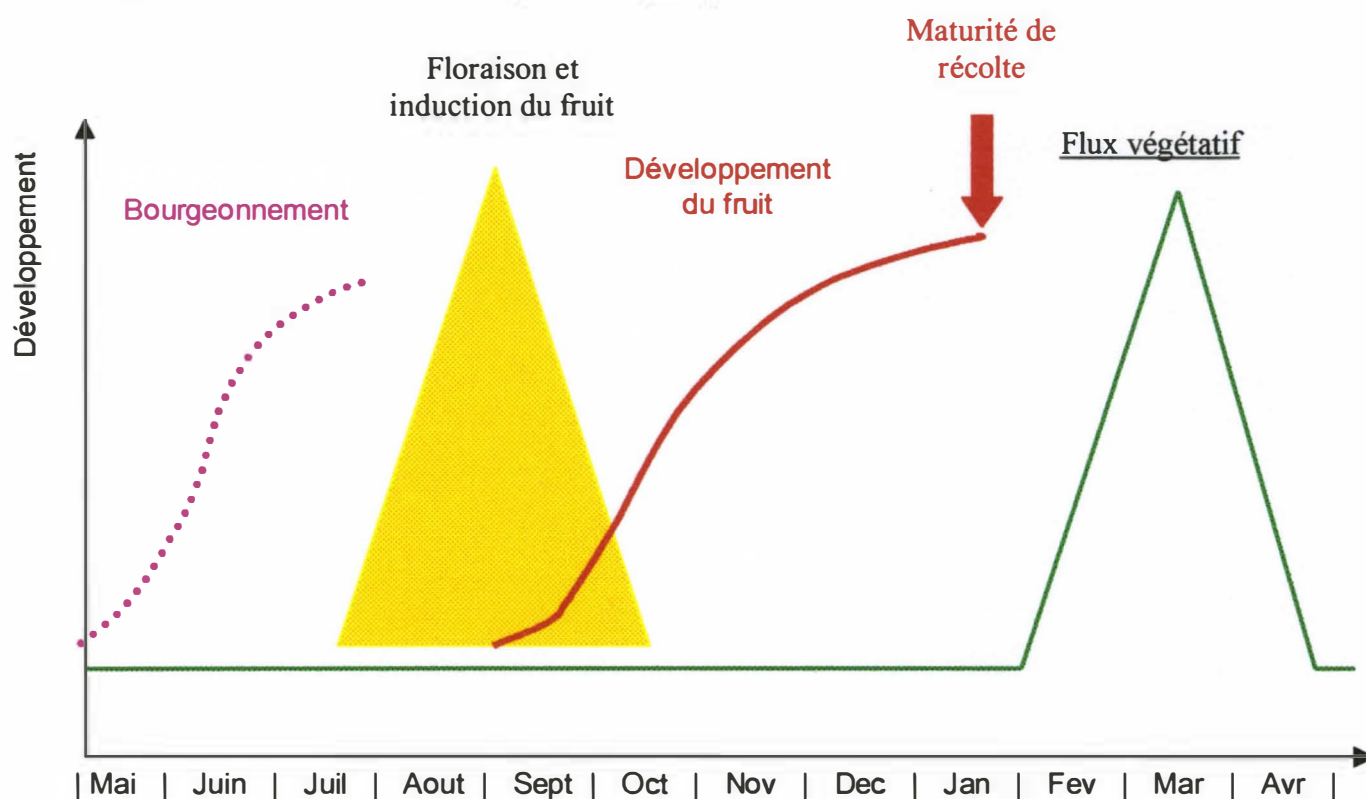
3.1. Cycle de croissance

Dans l'hémisphère sud, la floraison des manguiers et l'induction des fruits a lieu du mois de juillet au mois d'octobre (cf. figure 10). Généralement, deux à trois floraisons se produisent chaque saison. Les fruits connaissent une phase de développement pouvant durer selon les cultivars de 12 à 18 semaines; la période de récolte se déroule de décembre en avril.

Le cycle de vie de la mangue a été partagé en quatre stades (S. Lakshminarayana, Mango, 1980):

- Le stade juvénile jusqu'à la troisième semaine après fertilisation de la fleur, caractérisé par une multiplication cellulaire importante et rapide.
- Le stade adolescent de la quatrième à la septième semaine, période de croissance maximale due au grossissement cellulaire.
- Le stade de maturité jusqu'à la onzième semaine, le fruit atteint sa crise climactérique et commence à mûrir;
- Le stade sénescet durant lequel la mangue développe son goût et ses arômes pour devenir consommables, avant de se dégrader.

Figure 10: Cycle phénologique théorique de la mangue:



3.2. Développement morphologique de la mangue

La croissance du fruit peut être suivie avec des indicateurs morphologiques tels que la longueur, le diamètre, la circonférence, le poids, le volume, la couleur ou la forme du fruit. L'étude de ces indicateurs sur le cultivar Alphonso a montré que la mangue croît rapidement à partir de la cinquième semaine après induction du fruit, puis son développement ralentit entre la neuvième et la quatorzième semaine: la croissance suit une courbe sigmoïdale.

3.3. Biochimie et évolution biochimique de la mangue

Les changements de composition du fruit pendant la croissance et le développement sont des facteurs déterminants de la qualité ultérieure du produit. Ces variations diffèrent considérablement selon les variétés et les régions de culture des manguiers.

3.3.1. Eau

L'eau est primordiale pour le développement du fruit, pour permettre les mouvements et la structure cellulaires. Le taux d'humidité de la mangue est faible pendant la phase juvénile du fruit (70%), puis il atteint un maximum pendant la phase de grossissement cellulaire (86%), décroît légèrement, et reste constant jusqu'à maturité. Le taux d'humidité de la mangue est moins grand dans la peau que dans la chair à tous les stades de maturité

3.3.2. Glucides

3.3.2.a Biochimie

Les principaux glucides présents dans les végétaux comprennent les oses, les diholosides, les polyholosides et les hétérosides. Les oses et les diholosides constituent ce que l'on appelle habituellement les sucres.

Les oses les plus répandus sont les pentoses comme le ribose, et les hexoses comme le glucose et le fructose. Les glucides solubles (sucres) jouent un rôle important dans les propriétés organoleptiques des fruits: La saveur résulte de la balance sucres/acides organiques.

Les diholosides avec principalement le saccharose (glucose + fructose) est la forme de transport glucidique la plus fréquente (sève élaborée).

Les polyholosides sont des macromolécules formées de plusieurs chaînes plus ou moins ramifiées d'oses. Certains vont déterminer la texture (cellulose, pectine, amidon).

Les hétérosides sont des composés qui comportent une partie osidique et un reste aglycone: anthocyanes, flavones. La couleur est souvent liée à ces dérivés des sucres.

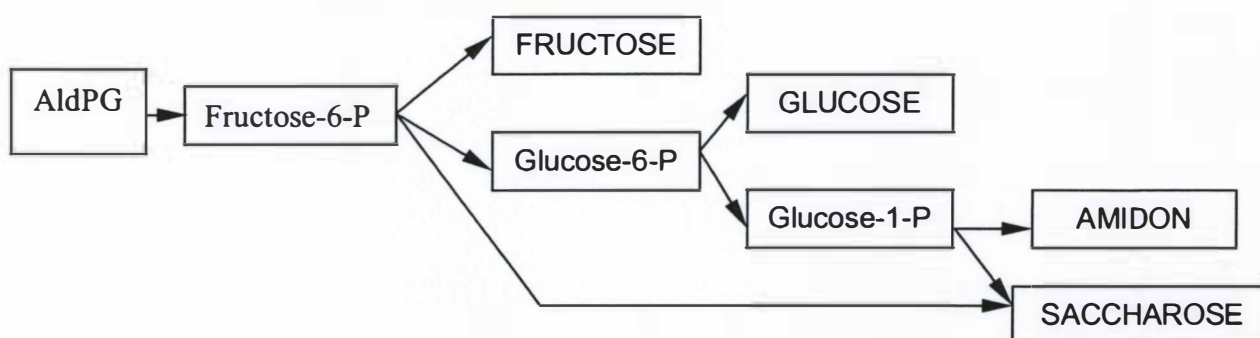
Les glucides résultent de l'assimilation du CO₂ par les feuilles des végétaux: à partir de l'énergie lumineuse, la photosynthèse permet la formation d'un réducteur (NADPH) qui va intervenir dans le cycle de Calvin au cours duquel se métabolisent les glucides.

L'acte photochimique conduit à la formation d'un réducteur lequel ne réduit pas le CO₂ lui-même, mais le phosphoglycérate (APG) en aldéhyde phosphoglycérique (AldPG). La fixation du CO₂ dans la photosynthèse et le cycle de Calvin conduisent de 5 trioses à 3 pentoses. Les glucides sont biosynthétisés à partir de l'AldPG, ils vont ensuite migrés hors des tissus assimilateurs par la voie de la sève élaborée.

A partir de l'AldPG sont synthétisés les hexoses suivant (cf. figure 11)

- Fructose-6-P qui par déphosphorylation va donner le fructose.
- Glucose-6-P qui par déphosphorylation va donner le glucose.
- Glucose-1-P qui va former l'amidon, et qui avec le fructose-6-P va former le saccharose.

Figure 11: Biosynthèse des glucides dans les végétaux.



Les glucides sont les principaux métabolites substrats des voies cataboliques (glycolyse, cycle de Krebs, cycle des pentoses, phosphorylations oxydatives). Ces voies permettent de fournir de l'énergie et des matériaux nécessaires aux cellules.

L'accumulation des sucres solubles résulte non pas d'une évolution progressive pendant la croissance du fruit, mais d'une brusque augmentation à la maturation. De nombreux fruits, dont la mangue, contiennent au début de l'amidon, dont la teneur diminue fortement lors de la maturation. Cette diminution correspond à une transformation en sucres solubles dont une partie seulement est oxydée lors de la crise climactérique.

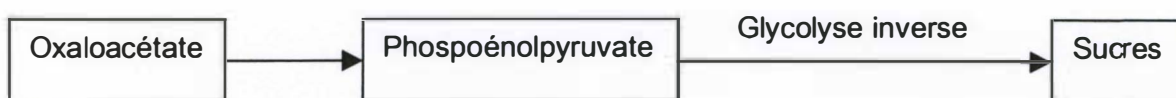
3.3.2.b Évolution des glucides au cours de la maturation

Le principal changement de composition glucidique pendant la phase de développement est l'accumulation d'amidon dans la pulpe et la peau.

Selon les cultivars le taux de sucres libres diminue ou augmente au cours de la maturation du fruit (P.K. Mukerjee). Les travaux de S.Lakshminarayana et *al.* (1970) sur le cultivar Alphonso montrent que le pourcentage total de sucres libres totaux diminue au cours du développement avec une augmentation au cours du mûrissement. Au total, on peut dire que les pourcentages de sucres totaux varient peu au cours de la maturation. Seul le saccharose, augmente d'un facteur 3 ou 4 pendant le mûrissement, ce qui explique l'augmentation des sucres totaux. Cette augmentation du taux de saccharose est attribuée à la dégradation des granules d'amidon.

L'augmentation des sucres serait du, selon une théorie de Matto et Modi (1970), à l'action d'enzymes comme la *citrique lyase* qui permet de convertir les acides organiques en sucres par un mécanisme de glycolyse inverse (cf. figure 12).

Figure 12: schéma de la glycolyse inverse.



3.3.3. Les acides organiques

3.3.3.a Biochimie des acides organiques

Les acides organiques proviennent du cycle de Krebs. Ces acides sont formés par une suite de réactions dont le premier élément est l'acide pyruvique qui résulte de la glycolyse. Par association avec l'acétyl-coA, l'acide pyruvique va être dégradé en formant de nombreux intermédiaires: Acides citrique, isocitrique, α -cétooglutarique, succinique, fumarique, malique, oxaloacétique.

Le cycle de Krebs, non seulement fournit des réducteurs et de l'ATP, mais encore donne naissance à des métabolites, acides cétoniques notamment utilisables pour d'autres synthèses. Dans les fruits les acides di- et tricarboxyliques sont présents en quantité non négligeable. Très généralement à l'état libre ou en mélange, les plus communs sont les acides malique, citrique, pyruvique, oxalique et succinique dans la mangue.

Leur teneur relativement faible dans les fruits très jeunes augmente dans la période de grandissement cellulaire pour diminuer très nettement à la maturation, du fait de leur oxydation, mais aussi de leur utilisation comme précurseur des sucres et des protéines.

Les conditions climatiques ont une profonde influence sur la teneur en acides des fruits: les climats frais ou humides conduisent à des fruits aigres. A température élevée, les acides organiques sont utilisés pour la respiration alors qu'ils s'accumulent à température basse.

3.3.3.b Evolution des acides organiques au cours de la maturation.

L'acidité titrable de la mangue diminue lors du développement, mais les acides organiques montrent des comportements variables. L'acidité est d'ailleurs variable selon les cultivars.

Pour la mangue Alphonso, Shashirekha et Patwardhan ont mis en évidence une augmentation des acides uroniques et maliques, et une diminution des acides citriques et succiniques au cours du développement.

Certains acides comme les acides α -cétooglutarique et pyruvique suivent l'augmentation de la respiration durant la crise climactérique (Krishnamurthy *et al.* 1977). Le pic de concentration de ces acides est observé 2 à 3 jours avant le pic climactérique. puis les teneurs diminuent à l'état de traces après la crise.

La diminution de l'acidité joue un rôle important sur la balance sucres/acides organiques. Cet équilibre influence les propriétés organoleptiques du fruit (goût et saveurs).

3.3.4. Protéines et acides aminés

3.3.4.a Biochimie de l'azote

Les protéines sont avec les glucides, les lipides et les acides nucléiques, les constituants chimiques les plus fondamentaux et les plus permanents de la matière vivante; il s'agit de composés azotés à base d'acides aminés.

Les protéines sont des macromolécules formées de longues chaînes polypeptidiques avec souvent plusieurs centaines d'acides aminés.

Les végétaux tirent leur azote du sol. Ils peuvent l'assimiler sous forme organique lorsqu'il s'agit de petites molécules, mais l'azote minéral ammoniacal (NH_4^+) et nitrique (NO_3^-) est préférentiellement utilisé.

La biosynthèse des acides aminés s'effectue pour une part sur les lieux de réduction des nitrates (donc racines ou feuilles). Toutefois elle se poursuit, notamment pour les transaminations et les conversions diverses, dans tous les tissus, en particulier dans les mitochondries et les chloroplastes, organites qui mettent à la disposition les acides cétoniques, les réducteurs (NADH et NADPH) et les sources d'énergie (ATP) nécessaires.

La protéogénèse s'effectue sur les ribosomes du cytoplasme, les mitochondries et des chloroplastes. L'ordre dans lequel s'accrochent les acides aminés est régi par les ADN du noyau et des organites cellulaires.

La mangue n'est pas une source riche en protéines (0.5 à 1% de la matière fraîche), avec des disparités selon les cultivars.

3.3.4.b Évolution des protéines et acides aminés au cours de la maturation

La pulpe contient moins de 0.2% d'azote. La teneur en azote total dans le fruit diminue fortement pendant les six premières semaines après l'induction, puis reste constante jusqu'à maturité physiologique (Lakshminarayana et al. 1970).

Il a été trouvé douze acides aminés libres dans la mangue Pairi et dix-sept dans l'Alphonso. Il apparaît une forte concentration en acides aspartique et glutamique qui diminue brusquement lors de la respiration climactérique. (Shantha Krishnamurthy et Subramanyam, 1973)

3.3.5. Éléments minéraux

3.3.5.a Biochimie des minéraux

Le végétal, comme tous les êtres vivants, a un besoin absolu d'éléments minéraux qui participent à ses structures et contribuent à ses activités. Ils sont classés, selon leur importance pondérale, en deux groupes:

- Les macroéléments présents à des taux de l'ordre de quelques p.mille à quelques p.cent (azote, potassium, calcium, magnésium, soufre, phosphore)
- Les oligoéléments, à des taux inférieurs à 1 p.mille (fer, manganèse, zinc, cuivre, aluminium, bore...etc).

Les minéraux sont collectés sous forme d'ions chez les végétaux supérieurs dans la solution du sol par les poils absorbants de la racine.

Ils ont des rôles variés dans la plante:

→ Le potassium est un élément d'une extrême importance indispensable à tout végétal. Il est mobile, sous forme d'ions K^+ , dissous dans les liquides intracellulaires. Son abondance et sa mobilité en font le cation le plus important pour la création de la pression osmotique. Ainsi il joue un rôle déterminant dans le contrôle des mouvements de cellules ou d'organes commandés par des variations de pression osmotique. De même c'est lui qui pour l'essentiel assure l'équilibre acido-basique de la cellule. Il accompagne les anions dans leur accumulation et leur migration, notamment les ions NO_3^- jusqu'à leur lieu de réduction. De plus le potassium a des fonctions dans l'activation de certaines kinases, dans les réactions de synthèse des polyholosides et des protéines. Il active plus de 60 enzymes. Il participe aussi plus ou moins directement à d'autres fonctions: il favorise la photosynthèse, et il diminue la transpiration réduisant ainsi les risques de flétrissement en cas de sécheresse.

→ Le sodium pénètre difficilement dans les cellules végétales, qui ont tendance à le refouler. Il est l'élément couramment utilisé comme ion d'accompagnement pour introduire un anion dans un engrais ou une solution nutritive.

→ Le calcium est peu mobile mais facilement adsorbé par les membranes biologiques. On le trouve dans les régions superficielles de la cellule. Il neutralise les acides pectiques de la lamelle moyenne. Il se fixe sur les sites négatifs des têtes polaires des phospholipides et tend à les rapprocher les uns des autres pour leur donner plus de cohésion. Ainsi il diminue la perméabilité cellulaire et freine la pénétration de l'eau et de la plupart des ions. Le calcium pénètre néanmoins dans les cellules. Il y neutralise alors les acides organiques surtout dans les tissus âgés. Il joue aussi un rôle important dans l'osmorégulation, l'activation de certaines enzymes, et l'action de certaines hormones.

→ Le magnésium est un constituant de la chlorophylle. C'est aussi l'activateur des ATPases et de certaines kinases.

3.3.5.b Rôle et évolution des minéraux dans la mangue

Les minéraux ont une influence sur la qualité des fruits. Les déficiences minérales ou excès ne se traduisent pas seulement par une baisse de croissance et de productivité. Certains symptômes de carence ou de toxicité se manifestent et sont visibles à l'œil nu. Dans les fruits, il a été montré par exemple que le calcium retarde la maturation et la sénescence, et permet de réduire les dégradations lors du stockage post-récolte.

Les minéraux sont importants pour les activités métaboliques variées du tissu vivant. Plus de 50% des minéraux de la mangue sont localisés dans la pulpe sauf le calcium. La composition minérale d'une mangue mûre a été rapportée par Gopalan et al (1977) présentée dans la figure 13.

Il a été observé dans la mangue Alphonso par Subramanyam que les minéraux sont en concentrations variables dans les tissus lésés (translocation, relâchement membranaire). En particulier, dans les tissus malades, la teneur en calcium diminue alors que le taux de phosphore augmente considérablement.

Figure 13: Composition minérale de la mangue

Minéral	Concentration en mg/100g
<i>Calcium</i>	14
<i>Phosphore</i>	16
<i>Fer</i>	1,3
<i>Magnésium</i>	27
<i>Sodium</i>	26
<i>Potassium</i>	205
<i>Cuivre</i>	0,2
<i>Soufre</i>	17
<i>Chlorure</i>	3
<i>Total</i>	400

3.3.6. Vitamines

3.3.6.a Composition en vitamines de la mangue

La mangue mûre est une excellente source en vitamines dont les principales sont la vitamine C (acide ascorbique), la provitamine A (β -carotène), et quelques vitamines B (B1=thiamine et B2=riboflavine). Leurs concentrations varient selon les cultivars et leurs origines (d'après Nirmal Ramburn et Gérard de Fontenay, Prosi, diversification agricole, janvier 2000).

Le taux de provitamine A (carotène) de la mangue est l'un des plus élevés qui soient pour un fruit frais : il peut dépasser 10 mg aux 100 g, il est plus habituellement de l'ordre de 3 mg (ce qui est un taux supérieur à celui du melon ou de l'abricot, les deux fruits "métropolitains" les plus riches en provitamine A). Le taux de provitamine A augmente avec le degré de maturation du fruit, et avec l'intensité de la couleur de la chair (les mangues d'un orangé foncé sont les plus riches en provitamine A).

La vitamine C atteint en moyenne 44 mg aux 100 g dans la mangue, soit un taux comparable à celui des agrumes (pomélo, orange ou clémentine), fruits qui sont considérés comme nos sources privilégiées de vitamine C. Contrairement à ce qui se passe pour la provitamine A, la vitamine C est plus abondante dans la mangue immature (on en trouve 110 à 130 mg), et son taux décroît quand le fruit mûrit.

La mangue renferme aussi des vitamines du groupe B, en quantités comparables à celles qu'on trouve dans les autres fruits frais : vitamine B1 : 0,03 mg ; vitamine B2 : 0,05 mg ; vitamine B3 : 0,4 mg ; vitamine B5 : 0,16 mg ; vitamine B9 : 0,05 mg. Elle est bien pourvue en vitamine E : 1,8 mg aux 100 g.

3.3.6.b Evolution des vitamines au cours de la maturation

Des études sur la vitamine C ont montré que sa concentration varie de 13 à 80 mg pour 100 grammes de pulpe selon la région du fruit (peau, chair) et selon son stade de développement. Lakshminarayana et al ont montré que le taux d'acide ascorbique croît au début du développement des fruits pour atteindre un maximum au cours de la cinquième

semaine après induction du fruit, puis décroît jusqu'à la huitième semaine, à partir de laquelle il se stabilise.

3.3.7. Pigments

Les changements dans la composition de la mangue en pigments ont été étudiés pour les stades finaux, quand le fruit est prêt à la récolte ou au cours du mûrissement. Le changement visuel de la couleur de la surface qui passe du vert foncé au jaune orange. La chair change aussi de couleur du blanc crémeux au jaune orange. Les caroténoïdes sont à des taux très bas au cours de la croissance et du développement et augmentent lors de la maturation.

En fait lors du mûrissement, il y a un changement dans la composition en pigments (Jacob et *al.* 1970): le taux de carotènes totaux est multiplié par 20, et celui du β -carotène est multiplié par 10.

3.3.8. Les acides gras

Les principaux acides gras présents dans la mangue sont sous forme de triglycérides. Les acides gras trouvés sont les acides myristique, palmitique, plamitoléique, stéarique, oléique, linoléique, et linolénique.

3.4. Circulation des nutriments dans les végétaux

La circulation des nutriments se fait par l'intermédiaire de la sève. Il faut distinguer deux types de sèves: la sève brute et la sève élaborée (cf. figure 14).

→ La sève brute: c'est une solution très diluée de minéraux avec quelques composés organiques, notamment des aminoacides. La sève brute originaire des racines circule par les vaisseaux du xylème. C'est la transpiration qui est le principal moteur de la montée de la sève. Elle sert au transport de l'eau et des éléments minéraux. Arrivée dans les organes aériens, la sève brute se répand dans les tissus et la plus grande partie s'évapore. Toutefois une petite partie se charge des produits de la photosynthèse et redescend sous forme de sève élaborée.

→ La sève élaborée, dont le rôle est beaucoup plus le transport des substances organiques que celui de l'eau. Elle est aussi beaucoup plus concentrée que la sève brute. Elle contient les glucides élaborés par les feuilles ou provenant de l'hydrolyse des réserves, ainsi que des aminoacides, des amides, des éléments minéraux et aussi certaines hormones. Cette sève circule habituellement des organes élaborateurs (feuilles) aux tissus d'utilisation et de réserve. Sa principale direction est donc descendante, des feuilles aux racines par les tubes criblés du phloème. Mais la circulation peut se faire dans le sens inverse lors de la mobilisation des réserves.

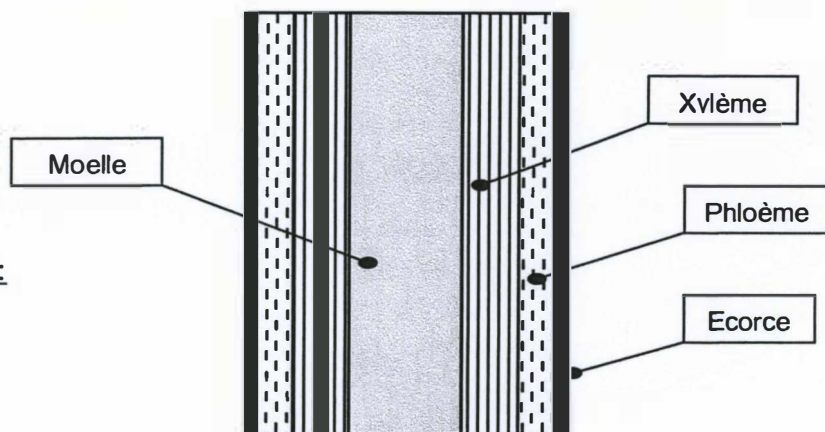


Figure 14:
Compartimentation du rameau:

3.5. Physiologie du mûrissement

La physiologie du mûrissement dépend de nombreuses activités métaboliques permettant d'obtenir un fruit de qualité acceptable. Cette dernière va dépendre de différents facteurs qui doivent être fixés pour homogénéiser la qualité des fruits. Il faut:

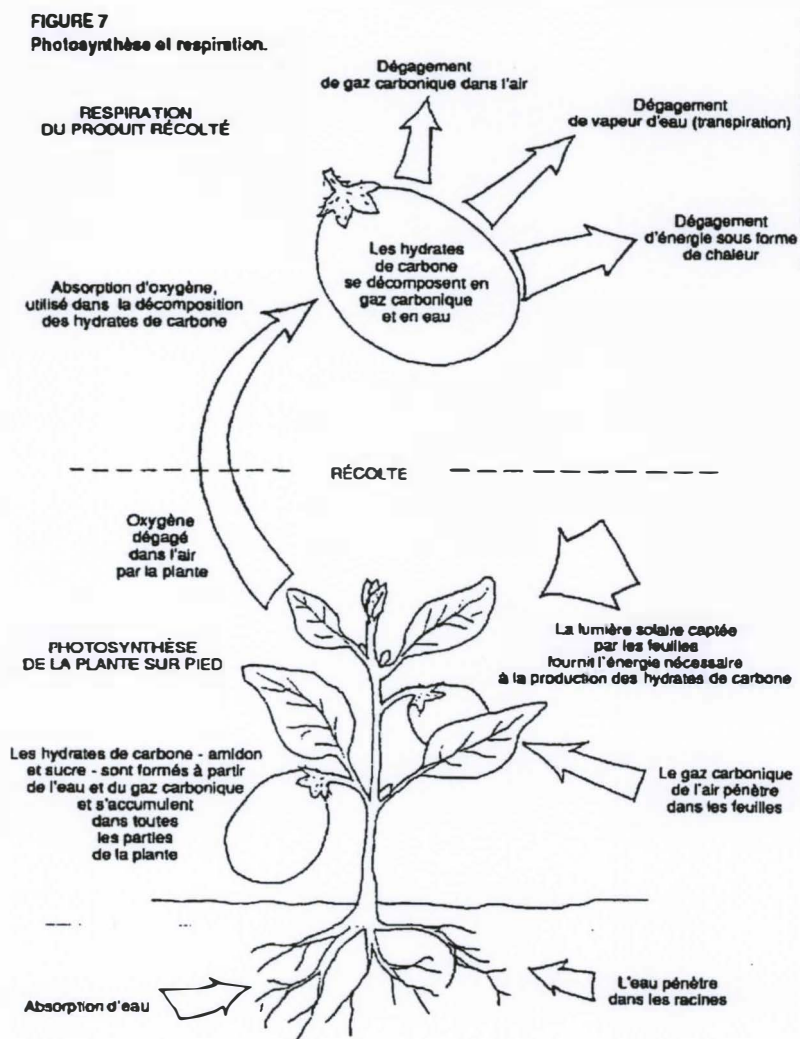
- ✓ un certain rapport sucres/acides organiques,
- ✓ un développement de la couleur,
- ✓ des caractéristiques de saveur et de texture convenant au consommateur.

Tous ces changements biochimiques ont lieu au cours d'une période de 10 à 14 jours à température ambiante après la récolte, et dépendent à la fois de la variété et du stade de maturité à la récolte.

3.5.1. La respiration

La respiration est le processus par lequel les plantes absorbent de l'oxygène et rejettent du gaz carbonique. L'oxygène de l'air décompose les métabolites de la plante (essentiellement les hydrates de carbone) en gaz carbonique, en eau et en énergie dont une partie est utilisée par la plante et le reste étant évacué sous forme de chaleur. La respiration est une réaction fondamentale de tous les végétaux (cf. figure 15).

Figure 15: Schéma de la respiration des végétaux.



Les fruits climactériques sont récoltés avant que le mûrissement n'ait eu lieu. Les changements du métabolisme sont annoncés par une crise respiratoire marquée.

Les variations de la respiration sont classées en quatre phases distinctes (Subramanyan et al. 1975)

- ✓ Une phase pré-climactérique durant 3 jours pendant laquelle les mangues sont vertes et fermes, et le dégagement de CO₂ est faible.
- ✓ Une croissance climactérique pouvant durer jusqu'à 6 jours au cours de laquelle les fruits restent verts et fermes et on observe une augmentation progressive de la production de CO₂.
- ✓ Une crise climactérique entre le 6^{ème} et le 10^{ème} jour après récolte marqué par un pic de dégagement du CO₂. Les fruits deviennent colorés, doux et développent une odeur caractéristique de la variété de mangue.
- ✓ Une phase post-climactérique, quand le dégagement de CO₂ diminue et que le fruit renforce ses caractéristiques organoleptiques.

Après cette dernière phase, le fruit devient par la suite susceptible aux infections, et les mécanismes de sénescence s'amorcent progressivement.

Les rythmes et les tendances de la respiration sont influencés pour une grande partie par le stade de maturité à la récolte. Lakshminarayana (1973) a montré que la respiration climactérique a lieu quel que soit le stade de maturité à la récolte avec des intensités différentes. Il a noté une corrélation entre la maturité du fruit et l'extension de la phase pré-climactérique.

Selon Shanta Krishnamurthy et Subramanyam (1973), la respiration pendant le mûrissement a un grand impact sur la durée de vie lors du stockage, car ce procédé libère beaucoup d'énergie. La mangue perd progressivement de son poids (10 à 12%) par la respiration et la transpiration. Le contrôle et la diminution de l'activité respiratoire favorisent une conservation plus longue.

Il est donc intéressant de réguler ces pertes liées à l'évaporation:

- ✓ Prévenir la transpiration avec des atmosphères humides.
- ✓ Réduire la respiration (emballages plastiques micro-perforés, cires, enrobages,...etc).

3.5.2. L'éthylène

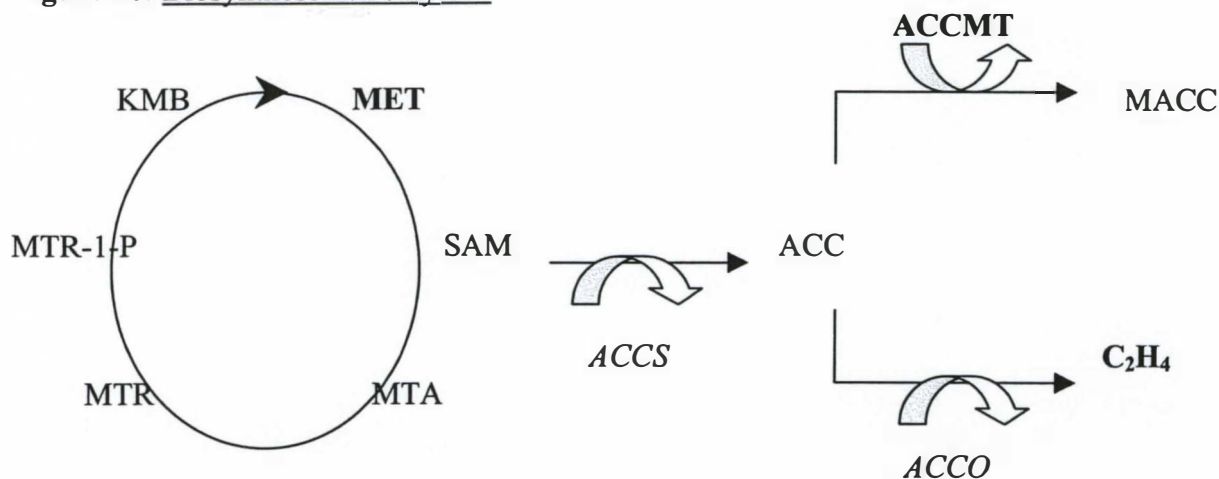
Les fruits climactériques (pomme, banane, tomate, mangue, etc...) présentent une forte activité respiratoire et un dégagement autocatalytique d'éthylène lié à la maturation. Chez ces fruits, la production d'éthylène est faible dans les premières phases de leur développement. Elle augmente dès que le fruit acquiert une aptitude à mûrir, et se poursuit après le détachement du fruit de la plante mère.

L'éthylène est une hormone dont l'action n'est pas clairement comprise. Sa production coïncide avec le pic respiratoire. Il active certaines enzymes (catalases, kinases et phosphatases) et inactive certains inhibiteurs.

L'éthylène a été mis en évidence pour la première fois par Gane (1934) chez la pomme à maturité. Les étapes de la biosynthèse de l'éthylène sont aujourd'hui élucidées. Elles correspondent à la chaîne métabolique présentée sur la figure 16 (Yang et Hoffnan, 1984).

L'éthylène peut être obtenu à partir de plusieurs composés (méthionine, acide linoléique, b-alanine, acide acrylique, éthane, éthanol, etc.) et selon plusieurs mécanismes réactionnels; ce qui a rendu difficile la mise en évidence de son précurseur biologique. Il est aujourd'hui admis que la méthionine est le précurseur biologique majeur de l'éthylène chez les plantes supérieures. Elle est convertie en S-adenosylméthionine (SAM) par incorporation d'ATP (Yang et Hoffman, 1984). La SAM est, à son tour, transformée en acide 1-amino cyclopropane carboxylique (ACC), précurseur immédiat de l'éthylène. S'il est généralement admis que l'ACC est le précurseur immédiat de l'éthylène chez les plantes supérieures, il peut cependant arriver que, dans des conditions sévères de stress, l'éthylène soit synthétisé à partir d'une voie indépendante de l'ACC, à partir d'autres composés comme les lipides (Dean et Mattoo, 1991 ; Ievinsh et Tillberg, 1995).

Figure 16: Biosynthèse de l'éthylène



Cycle méthionine :

MET :Méthionine ; **SAM** : S adenosyl Methyonine ; **MTA** : Méthylthioadénosine ;**MTR** : 5 -méthylthioribose ;
MTR-1-P : 5 –méthylthioribose-1-phosphate; **KMB**: acide 2-kéto-4-méthylthiobutyrique

Synthèse éthylène :

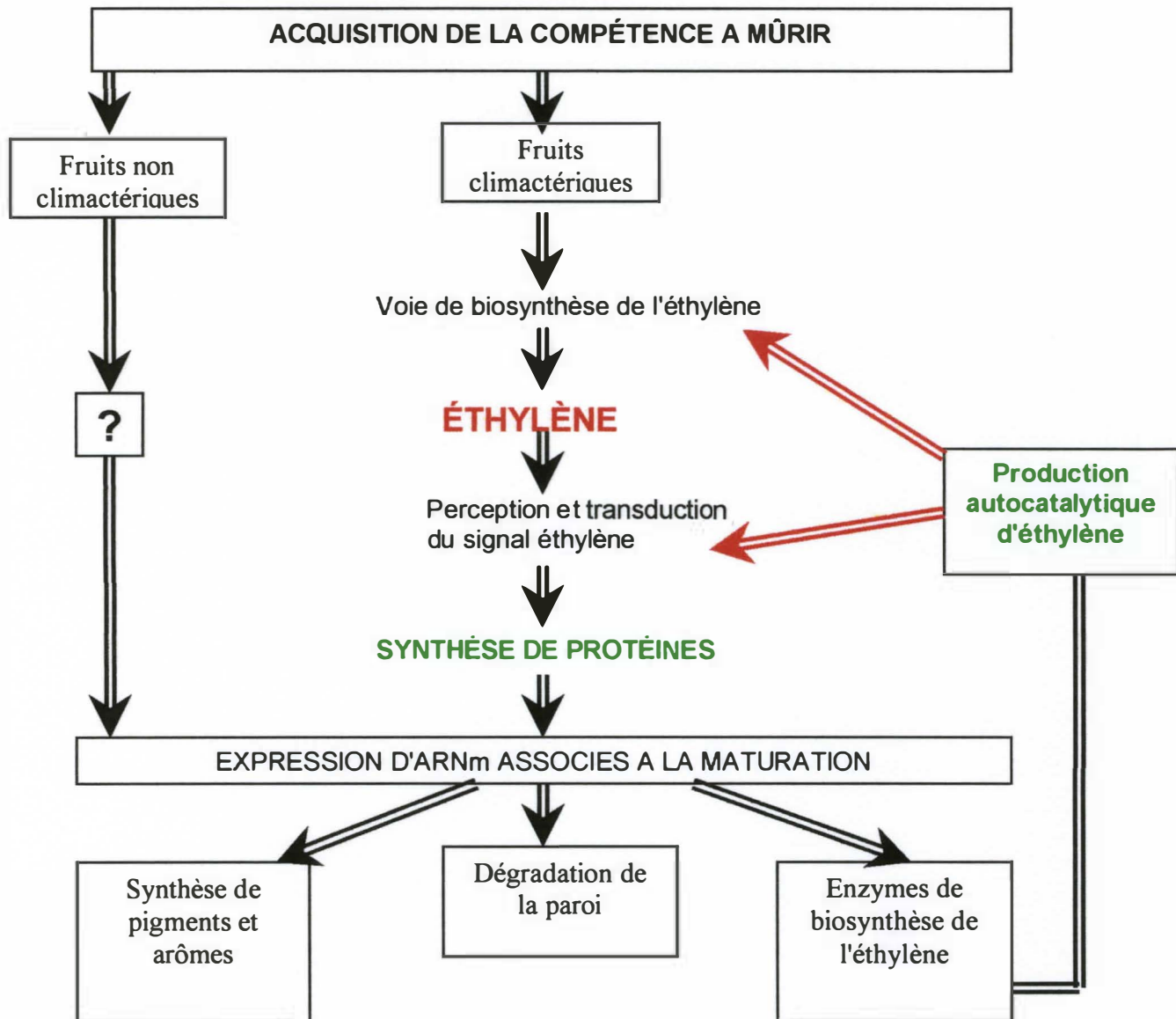
ACC : Acide cyclopropane-1-carboxylique ; **MACC** : Malonyl-ACC ; **C₂H₄** : ethylene;
ACCMT : Malonyltransferase ; **ACCS** (ou **ACS**) : ACC synthase ;**ACCO** (ou **ACO**) : ACC oxydase.

L'ACC synthase et l'ACC oxydase sont les enzymes clés de la voie de biosynthèse de l'éthylène chez les plantes supérieures. Ces deux enzymes catalysent respectivement la formation de l'ACC à partir de la SAM, et la conversion de l'ACC en éthylène. Il est aujourd'hui admis que la conversion de la SAM en ACC constitue l'étape limitante de la biosynthèse de l'éthylène (Yang et Hoffman, 1984). Cependant, quelques études ont rapporté une augmentation de l'activité ACC oxydase en réponse à des stimulations exogènes et endogènes également connues pour induire la synthèse d'éthylène; indiquant ainsi le rôle clé de cette enzyme (Kende, 1993 ; Vriezen et al., 1999).

Les données actuelles suggèrent que la transduction du signal éthylénique se fasse par une cascade de phosphorylations, lesquelles moduleraient l'activité des facteurs de transcription des gènes. Ils sont différemment régulés suivant le tissu, son état physiologique et le stimulus. Tous ces gènes codent pour des protéines de type histidine kinase.

Chez les fruits climactériques, la forte activité respiratoire et le dégagement autocatalytique de l'éthylène qui accompagnent la maturation sont nécessaires pour induire les modifications physico-chimiques et biochimiques telles que le changement de couleur, l'acquisition de la saveur ou encore la perte de fermeté (cf. figure 17). Il est connu depuis longtemps que l'éthylène exogène, d'une part, déclenche le mûrissement des fruits verts aptes à mûrir et, d'autre part, accélère le mûrissement déjà initié des fruits (Yang et Hoffmann, 1984).

Figure 17: Actions et rétro-contrôles de l'éthylène



Le commerce des fruits, au niveau de la production et de la commercialisation, fait appel à des techniques de contrôle du mûrissement qui permettent de planifier l'expédition et la distribution. Cependant les différents indicateurs des voies métaboliques ne sont pas suffisants pour exprimer une qualité car ils ne prennent pas en compte les disparités des conditions de maturation (température, humidité, état sanitaire) qui peuvent induire des variations dans les comportements post-récoltes.

Le rôle et la fonction de l'éthylène sur le métabolisme permettront de comprendre d'une part l'élaboration de la qualité lors du mûrissement et d'autre part d'établir les relations entre le type de conservation et la qualité gustative finale.

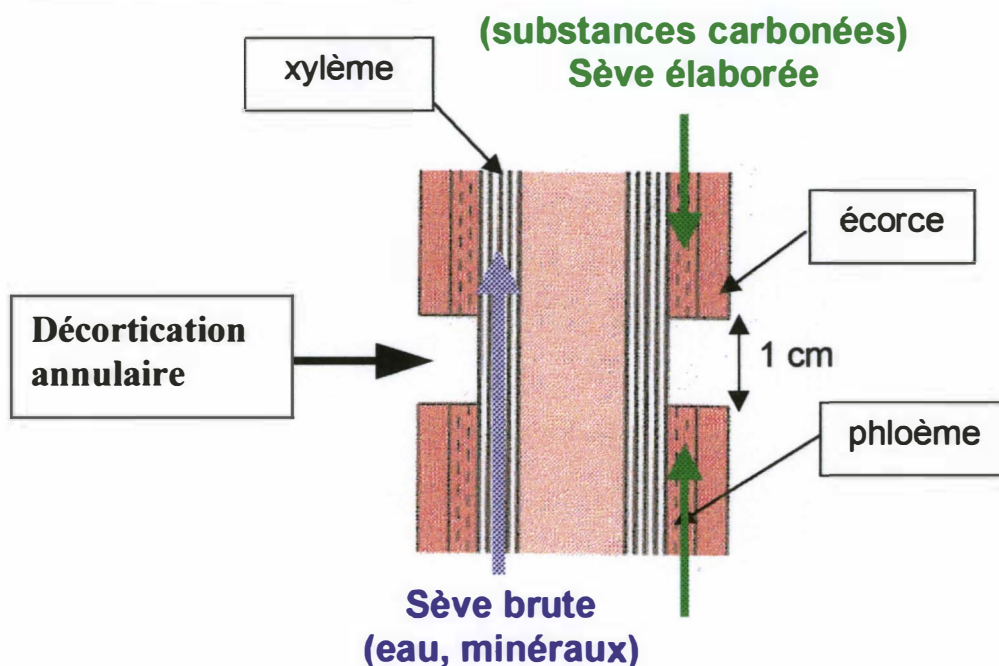
1 ECHANTILLONNAGE

L'échantillonnage des mangues a été effectué dans le cadre de la thèse de doctorat. Les mangues ont été cultivées sur la parcelle MA06 de la station Bassin Plat. C'est un verger de manguiers "Lirfa" greffés et plantés en 1985 à la densité $6 \times 5\text{m}$.

2 CONDITIONS EXPERIMENTALES

Les rameaux de manguiers subissent une décortication annulaire. La sève brute circule normalement, mais la sève élaborée ne migre plus (Cf. [figure 18](#)). Le rameau fonctionne en autarcie en terme de nutriments. Les fruits se développent dès lors uniquement à partir des substances produites par les réactions photosynthétiques et des assimilats contenus dans les feuilles et le rameau.

Figure 18: La décortication annulaire



Pour étudier l'influence de la disponibilité des apports carbonés, les rameaux sont préparés selon deux traitements:

- ✓ 10 feuilles par fruit
- ✓ 100 feuilles par fruit

Pour étudier l'influence du stress hydrique sur le fonctionnement de la plante, trois traitements sont mis en place sur la parcelle:

- ✓ témoin arrosé
- ✓ arrosage réduit (50%témoin)
- ✓ non irrigué

Au final, quatre types d'échantillons seront analysés:

- ✓ 100H: échantillons irrigués avec 100 feuilles par fruit
- ✓ 100S: échantillons non irrigués avec 100 feuilles par fruit
- ✓ 10H: échantillons irrigués avec 10 feuilles par fruit
- ✓ 10S: échantillons non irrigués avec 10 feuilles par fruits.

Donc, on appelle charge en fruit faible le traitement 100 feuilles/fruit, et charge en fruit forte le traitement 10 feuilles/fruit.

3 RECOLTE ET PREPARATION DES ECHANTILLONS

Les manguiers ont eu une floraison simultanée qui a eu lieu le 20 août 2001. Les premières mangues ont été cueillies le 19 octobre 2001, c'est à dire huit semaines après la floraison. La campagne de prélèvement s'est étalée sur douze semaines, la dernière récolte étant réalisée vingt semaines après la floraison (le 21 janvier 2002).

Pour chaque traitement, cinq rameaux sont annelés afin de disposer de cinq répétitions.

Dans le cadre de notre étude les analyses sont effectuées sur la pulpe découpée, après récolte. Un échantillon représentatif de 100 grammes étant prélevé.

Les échantillons ont été plongés dans l'azote liquide pour stopper les réactions enzymatiques (surgélation instantanée).

Deux types d'échantillons sont préparés: les échantillons lyophilisés et les échantillons frais. Les échantillons frais sont stockés à -20°C après le traitement à l'azote liquide. Les échantillons lyophilisés sont conservés en godets après lyophilisation pendant 72 heures dans le lyophilisateur de type *Dura Dry*. Seules les mangues issues des deux premières dates de récolte sont lyophilisées.

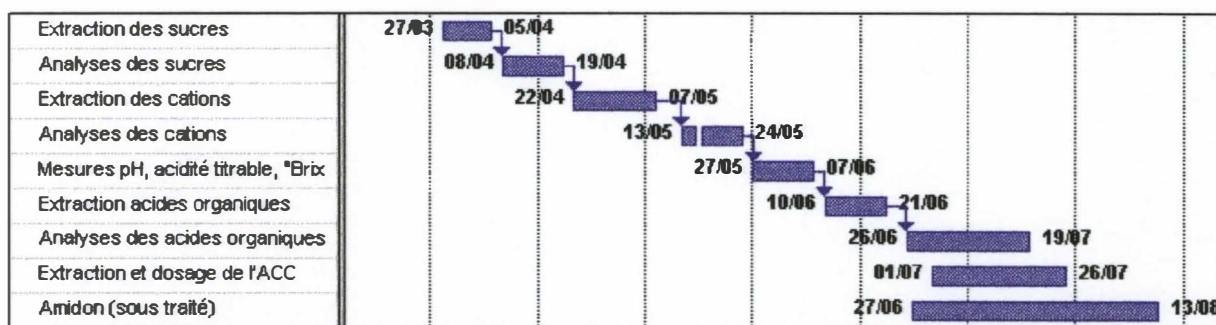
Sur chacun des 200 échantillons des mesures de concentrations en sucres, acides organiques, cations, amidon, et des cations, mesures du pH, acidité titrable, ESS et matière sèche sont réalisées. Une autre équipe a réalisé le dosage de l'ACC pour les dates de prélèvement les plus représentatives.

4 ORGANISATION DU TRAVAIL

Le laboratoire d'analyse du PAA ne dispose pas encore de l'ensemble du matériel nécessaire à toutes les mesures prévues. Par contre différents laboratoires internes ou externes au CIRAD permettent l'accès aux paillasses. D'où la nécessité d'engager une démarche méthodique, en préambule aux manipulations afin de:

- ✓ Calculer approximativement le temps d'extraction, et le temps d'analyse pour chacun des dosages, compte tenu du nombre important d'échantillons: 210 prélèvements au champ et 8 protocoles différents d'extraction ou de mesure (cf.figure 19).
- ✓ Prévoir des dates de disponibilités des appareils ou des intervenants pour chaque type d'analyse.
- ✓ Se renseigner des disponibilités des laboratoires auxquels on fait appel pour certaines mesures.

Figure 19: Planning des manipulations et analyses



5 MESURES MORPHOLOGIQUES ET ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES CLASSIQUES

5.1. Mesures morphologiques

Des mesures de poids, longueur, épaisseur et diamètre sont effectuées sur les fruits avant préparation. Le volume est calculé en considérant que la forme des fruits est parallélépipède ($\text{volume} = \text{longueur} \times \text{largeur} \times \text{épaisseur}$).

5.2. Préparation des échantillons

Une fraction de la pulpe congelée est dissociée pour la détermination de la matière sèche. La pulpe restante est décongelée, puis finement broyée à l'aide d'un broyeur à hélice *Grindomix GM200* de *RETSCH* et d'un broyeur-homogénéisateur à haute vitesse *Polytron PT1600E*. Le broyat est mis dans des godets et recongelé pour les opérations et les analyses.

5.3. Matière sèche

La matière sèche a été mesurée après broyage, pesage et étuvage de la pulpe de fruit. Les résultats, également utilisés pour la thèse en cours, ont été fournis par l'équipe d'écophysiologie.

5.4. ESS

L'extrait sec soluble est mesuré par réfractométrie sur le jus de mangue. Avec une pipette à partir du broyat de pulpe, quelques gouttes de jus sont prélevées et déposées **sur la** vitre du réfractomètre à main *ATC-1C* de *ATAGO* (°Brix de 0 à 32 et compensation de température). Dans le cas des échantillons lyophilisés, il est tenu compte de la teneur en matière sèche pour reconstituer une aliquote de matière fraîche (par exemple 1.25 grammes de pulpe sèche sont pesés pour un échantillon ayant un pourcentage de matière sèche de 12.5%, et complété avec de l'eau distillée pour aller jusqu'à 10 grammes). La solution est homogénéisée et le procédé est le même qu'avec les échantillons frais (prélèvement d'une goutte de jus).

5.5. pH et acidité titrable

Dans un bécher, 2 grammes de pulpe décongelée sont pesés et complétés à 20 millilitres d'eau distillée. Comme pour l'ESS, les échantillons lyophilisés sont reconstitués en rajoutant la quantité d'eau évaporée.

Le pH et l'acidité titrable sont mesurés à l'aide d'un titromètre automatique *titroline easy de SCHOTT*. Le bécher est placé sous agitation, une sonde potentiométrique mesure le pH. Une solution de soude 0.1 N est versée automatiquement jusqu'à atteindre un pH de 8.1 ± 0.2 .

Le volume de soude versé permet de calculer l'acidité titrable, exprimée en milliéquivalents pour 100g de matière fraîche selon la formule:

$$\text{Acidité}_{(\text{meq}/100\text{g MF})} = 100 \times \frac{V_{\text{NaOH}}}{\text{Masse}} \times C_{\text{NaOH}}$$

Avec : V_{NaOH} : Volume de soude versée (ml)

%MS: Pourcentage de matière sèche

C_{NaOH} : Concentration de la soude (0.1N)

Masse: poids de pulpe pesée (en g. de MF ou MS)

6 CATIONS

6.1. Extraction des cations de la pulpe de mangue

Cinq grammes de pulpe décongelée ou 1 gramme de pulpe lyophilisée sont pesés dans des godets, dans lesquels 10 ml d'une solution aqueuse d'acide trichloroacétique à 12% sont ajoutés. Ce traitement chimique dissocie les cations contenus dans les parois cellulaires de leurs supports, permettant de les isoler sous leur forme libre. La solution est agitée pendant 15 minutes. Il faut ensuite filtrer sous vide les échantillons sur membrane de porosité $0,45 \mu\text{m}$ pour recueillir la phase liquide. Le godet et la membrane sont bien rincés avec de l'eau ultra pure. Le filtrat est repris dans une fiole jaugée de 100 ml (dilution au $10^{\text{ème}}$) que l'on complète avec de l'eau ultra pure, en rinçant l'erien de filtration. Puis l'échantillon est stocké au congélateur jusqu'à l'analyse.

Pour les échantillons de pulpe fraîche assez mûre, la filtration est difficile, voir impossible. Une étape de centrifugation est ajoutée pour ne filtrer que le surnageant: trois fois 2 minutes à 5000 rpm, en rinçant le culot avec de l'eau ultra pure entre chaque centrifugation.

6.2. Dosage des cations

Le pôle agroalimentaire ne dispose pas pour l'instant de l'appareillage nécessaire pour ce dosage. Nous avons travaillé au laboratoire d'analyse des sols au CIRAD La Bretagne qui dose par CIA les cations et anions inorganiques dans différents milieux (sols, végétaux, résidus organiques).

6.2.1. Principe de la CIA

L'échantillon à analyser est introduit dans un tube capillaire rempli d'un électrolyte. Une différence de potentiel est appliquée entre les deux extrémités du capillaire. Sous l'effet du champ électrique, les espèces d'ions vont migrer vers la charge opposée. La séparation des espèces s'appuie sur leur mobilité, caractéristique physico-chimique basée sur la conductivité et la masse molaire d'un ion: plus un ion est petit et chargé, plus il est mobile, et donc plus sa vitesse de migration est importante.

6.2.2. Protocole d'analyse

CIA analyser WATERS

Les conditions utilisées sont celles décrites dans le cookbook Waters version 2.0 pour l'analyse des cations alcalins et alcalino-terreux.

Conditions expérimentales:

Electrolyte: UV CAT2.

Capillaire: composé de silice fondue et plongé dans l'électrolyte aux deux extrémités.

Potentiel d'analyse: un générateur permet de créer un potentiel de 20kV aux bornes du capillaire.

Courant: 10 μ A

Mode d'injection: hydrostatique qui utilise comme source d'énergie la gravité en surélevant le tube dans lequel le capillaire est plongé pendant 20 s. les volumes injectés sont de l'ordre de 10 nL.

Migration: en plus de l'effet du champ électrique, la migration est soumise au phénomène de FEO (Flux Electro-Osmotique), dû à la fois au faible diamètre du capillaire, à sa composition (présence de sites silanols), au pH de l'électrolyte et à la différence de potentiel entre les bornes du capillaire. Le FEO va accélérer l'analyse des cations.

Détection: UV inverse

185 nm/lampe mercure

Température: 20°C

Alimentation: positive

Constante de temps: 0.6 s

Acquisition: 20 points/s

Durée d'injection: 20 s

Précision: de l'ordre de 5%

Logiciel de pilotage: Millenium de Waters

Etalons: Potassium, ammoniac, sodium, calcium et magnésium en poudre pesée pour obtenir 3 solutions de concentrations diverses:

En mg/l	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	Mg ²⁺
Solution 1	1	70	5	1	1
Solution 2	3	50	10	3	5
Solution 3	5	30	20	5	10

6.3. Expression des résultats

La concentration en cations est obtenue directement par le logiciel Millenium (étalonnage externe) en mg par litre d'échantillon. Elle est convertie en mg pour 100 grammes de matière fraîche selon les formules suivantes:

$$[K^+]_{(mg/100G^*)} = [K^+]_{(mg/l)} \times Dil \times \frac{10}{1000 \times Masse pulpe} \times 100$$

$$\text{Echantillons lyophilisés : } [K^+]_{(mg/100gMF)} = [K^+]_{(mg/100gMS)} \times \frac{\%MS}{100}$$

*: MF si échantillon de pulpe fraîche

*: MS si échantillon lyophilisé

Avec Dil: Coefficient de dilution avant injection (ici au 10^{ème}).

Masse pulpe: masse de pulpe décongelée ou lyophilisée pesée pour l'extraction.

7 SUCRES

7.1. Mise au point de la méthode d'extraction des sucres

Le CIRAD dispose de protocoles expérimentaux pour extraire les sucres de la pulpe de fruits et les analyser ensuite par HPLC ionique. La saison précédente, les dosages ont été réalisés directement sur le jus de mangue (absence de matériel lié à la mise en place du laboratoire avec les équipements). Nous avons essayé plusieurs méthodes d'extraction alcoolique à chaud ou à froid, pour choisir celle qui était la plus fiable mais aussi la plus rapide à mettre en œuvre du fait du nombre important des échantillons.

Nous avons donc testé des extractions en mettant 5 grammes de pulpe décongelée dans 80 ml d'éthanol à 80% dans différentes conditions:

♦ **Chaud:** dans des ballons de 250 ml, sur la rampe d'extraction, ébullition douce, agitation et sous reflux.

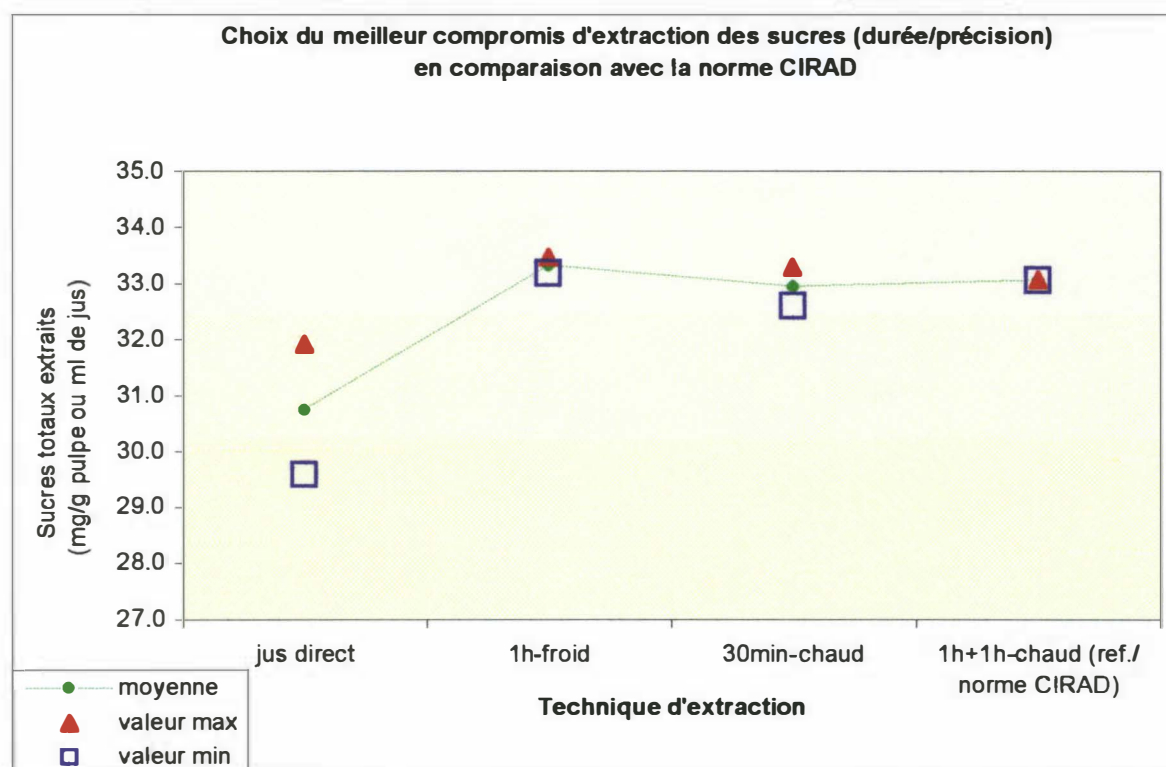
- ✓ 1 h + 1 h à chaud, au bout de la première heure, la solution est filtrée sous vide sur membrane de porosité de 0.22 µm, et l'extraction avec 80 ml d'éthanol à 80% est renouvelée sur la pulpe restante, en gardant le premier filtrat pour le joindre au deuxième plus tard.
- ✓ 1 h à chaud
- ✓ ½ h à chaud

♦ **Froid:** dans des erlens de 250 ml, agitation continue (environ 160 rpm), sur bain de sable de Fontainebleau.

- ✓ 1 h + 1 h à froid, au bout de la première heure, la solution est filtrée sous vide sur membrane de porosité de 0.22 μm , et l'extraction avec 80 ml d'éthanol à 80% est renouvelée sur la pulpe restante, en gardant le premier filtrat pour le joindre au deuxième plus tard.
- ✓ 1 h à froid
- ✓ ½ h à froid

Toutes les solutions obtenues sont filtrées en prenant bien soin de rincer à l'alcool éthylique la membrane, le ballon ou l'erlen. L'alcool du filtrat obtenu est évaporé sous vide à 45°C à l'aide d'un évaporateur rotatif jusqu'à obtenir 15 à 20 ml d'extract. L'extract est récupéré dans une fiole jaugée de 100 ml que l'on complète avec de l'eau ultra pure en rinçant l'erlen de filtration. Une aliquote d'environ 20 ml est mise dans un godet conservé au congélateur jusqu'à analyse.

Figure 20: **Concentration en sucres en fonction de la technique d'extraction**



Principe du dosage expliqué au paragraphe 7.2.2 ci-après.

Nous avons donc testé les différents temps d'extraction, à chaud ou à froid, et nous avons présenté certains résultats (cf. figure 20). On peut dire que l'extraction alcoolique à chaud ou à froid n'est pas différente. Il n'est donc pas indispensable de chauffer pour extraire les sucres de la pulpe de mangue.

De même, il n'est pas indispensable de prolonger l'extraction deux fois, car les résultats obtenus tant à froid qu'à chaud ne sont pas différents significativement (1 heure + 1 heure ou 1 heure simple).

Il semble qu'à froid la demi-heure de traitement soit légèrement plus faible que pendant une heure (31 mg/g au lieu de 33 mg/g de pulpe).

Par rapport au dosage des sucres directement sur le jus de mangue filtré, il apparaît une sous estimation de l'ordre de 6%, et une dispersion plus importante de la concentration en sucres d'environ 5%.

Grâce à cette étude préliminaire, nous avons choisi l'extraction à froid durant une heure. Ce choix est justifié par le gain de temps permis par cette technique plus simple à mettre en œuvre, et les résultats obtenus ne différant pas de ceux obtenus avec le protocole de la norme CIRAD.

7.2. Protocoles d'extraction et de dosage des sucres

7.2.1. Extraction des sucres

Après mise au point et choix de la méthode d'extraction des sucres de la pulpe de mangue, nous pouvons décrire un protocole expérimental valable pour la pulpe décongelée et la pulpe lyophilisée, selon le protocole CIRAD-PAA d'extraction des sucres au reflux d'éthanol à 80% basé sur le protocole du CIRAD Montpellier (code PC0907C).

Cinq grammes de pulpe décongelée ou 1 gramme de pulpe lyophilisée sont pesés et mis avec 80 ml d'une solution aqueuse d'alcool éthylique à 80% dans un erlen de 250 ml fermé à l'aide de parafilm. L'extraction se réalise à température ambiante sur agitation continue pendant 1 heure. Ensuite la solution est filtrée sous vide sur membrane de porosité 0.22 μm en prenant bien soin de rincer à l'éthanol 80% le filtre et l'erlen. La solution est transvasée dans un ballon pour évaporateur rotatif en rinçant la fiole contenant le filtrat avec 2 fois 5 ml d'éthanol 80%.

L'éthanol est évaporé sous vide à 50°C jusqu'à obtenir 15 à 20 ml de solution reprise dans une fiole jaugée de 100 ml. La fiole est complétée avec de l'eau ultra pure en rinçant le ballon d'évaporation. Après avoir agité, on verse une aliquote de la solution (20ml) dans un godet identifié et numéroté stocké au congélateur en attendant l'analyse chromatographique.

7.2.2. Dosage des sucres

Le dosage des sucres libres majeurs (fructose, glucose et saccharose) a été effectué au laboratoire régional de la Direction générale de la Concurrence, de la Consommation et de la répression des fraudes.

Les sucres sont analysés sous chromatographie liquide haute performance (HPLC) d'échange d'anions (ou chromatographie ionique)

7.2.2.a Principe de la chromatographie en phase liquide

La chromatographie est une technique d'analyse séparative et quantitative développée depuis le début du 20^{ème} siècle, et qui est très utilisée et améliorée de nos jours.

Les composés à séparer sont mis en solution dans un solvant. Ce mélange est introduit dans la phase mobile liquide (éluant). Suivant la nature des molécules, elles interagissent plus ou moins avec la phase stationnaire contenue dans le tube appelé colonne de chromatographie.

La chromatographie en phase liquide est une méthode physico-chimique basée sur des différences d'interactions entre les solutés, la phase mobile et la phase stationnaire.

La phase mobile, poussée par un gaz vecteur pompé sous haute pression, parcourt en permanence le système chromatographique. Le mélange de solutés dissous dans un solvant est injecté par l'intermédiaire d'une vanne, puis transporté au travers du système. Au niveau de la colonne, les composés en solution se répartissent suivant leur affinité entre la phase mobile et la phase stationnaire.

La théorie de la séparation montre que le signal enregistré à la sortie d'un détecteur approprié en fin de colonne a la forme d'un pic. Si la séparation est bonne, chaque pic représente un constituant du mélange à séparer et à doser. L'ensemble des pics enregistrés est appelé chromatogramme.

7.2.2.b Principe de la chromatographie ionique

Le principe de la chromatographie ionique est basé sur l'ionisation partielle ou totale des espèces à séparer sous un potentiel donné. Les molécules ionisées peuvent alors être séparées par échange d'ions avec la phase stationnaire et la phase mobile.

L'échange d'ions est une technique de séparation utilisant la compétition entre les ions à analyser et les ions de l'éluant.

Les sucres sont des molécules électrochimiquement actives et se comportent à pH fortement basique ($\text{pH} > 12$) comme des acides faibles. Les sucres ionisés sont retenus par la phase stationnaire porteuse de groupements ammonium, puis séparés sélectivement par l'éluant en fonction de leur charge.

La détection se fait par ampérométrie pulsée, technique basée sur la mesure du courant d'oxydation des sucres à un potentiel déterminé, la concentration des sucres étant proportionnelle au courant d'oxydation mesuré à la surface de l'électrode de travail.

L'électrode est soumise à un cycle de trois potentiels répété deux fois par seconde: potentiel d'oxydation des sucres, potentiel de nettoyage de l'électrode, potentiel de reconditionnement de l'électrode. l'ampérométrie pulsée permet une mesure:

- stable: le cycle de potentiels permet un nettoyage continu de l'électrode.
- spécifique: seules les molécules possédant un groupement alcool secondaire répondent au potentiel d'oxydation.
- sensible: le seuil de détection est de quelques dizaines de picomoles.

Le logiciel couplé au chromatogramme permet le pilotage de l'appareillage, l'acquisition des données, ainsi que le traitement des résultats.

Les pics obtenus sont identifiés, intégrés et quantifiés à partir d'un étalon externe.

Conditions expérimentales:

Appareil **DIONEX**

Colonne: Carbopac PA1, 4 x 250 mm (rèf. PN035391)

Phase stationnaire: résine de billes de polystyrène-divnyl-benzène recouvertes de microparticules de latex, porteuses de groupements ammonium quaternaire.

Pré-colonne: Carbopac PA1 guard

Boucle d'injection de 25 μl

Eluant: solution composée de 85% de soude à 200 mM et de 15% d'eau ultra-pure.

Mode d'élution: isocratique (toujours le même éluant tout au long de la migration)

Débit d'éluant: 1 ml/min

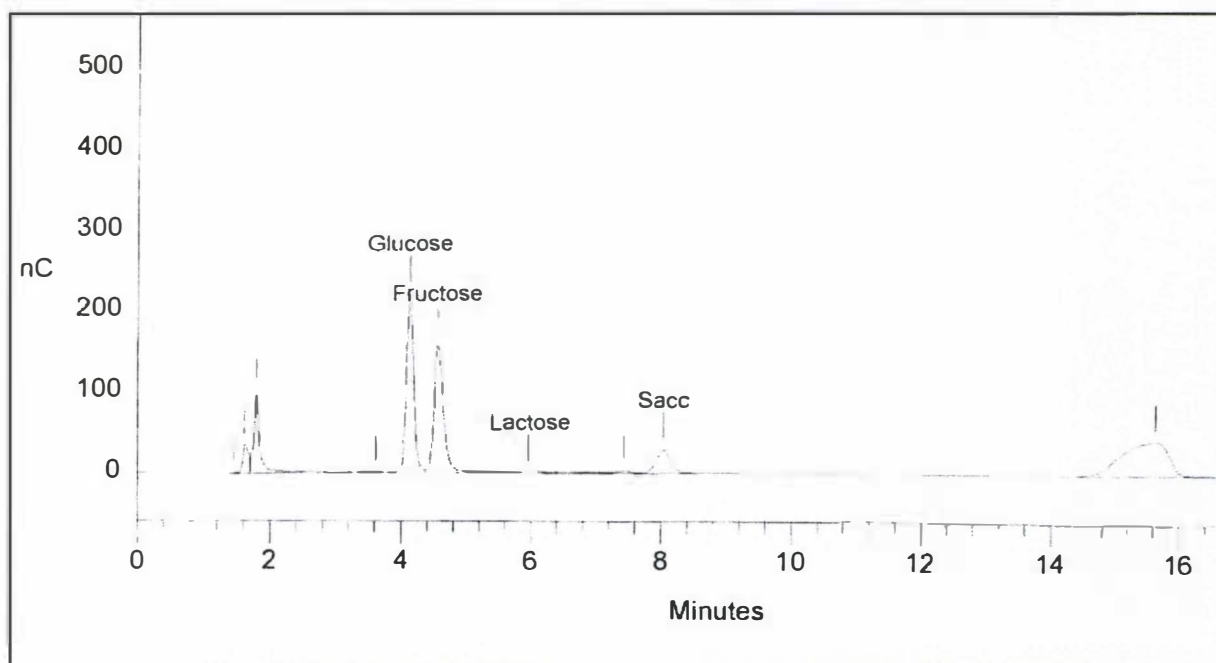
Détecteur: de type ED40

Logiciel de pilotage: Peaknet de DIONEX

Etalons: glucose, fructose et saccharose en poudre, pesés pour obtenir une solution à 10 mg/l de chaque étalon.

Avant injection des solutions échantillons, ces dernières sont diluées à l'eau ultra pure au 50^{ème} (1 ml dans une fiole de 50 ml). Il faut environ 17 minutes d'analyse par échantillons.

Figure 21: Exemple de chromatogramme obtenu pour un échantillon de pulpe



7.3. Expression des résultats

Les résultats sont obtenus en mg par litre de solution, et exprimés en mg de sucres pour 100g de matière fraîche selon les formules:

$$[\text{Sucres}]_{(\text{mg}/100\text{g}^*)} = [\text{Sucres}]_{(\text{mg}/\text{l})} \times \text{Dil} \times \frac{100}{1000 \times \text{masse pulpe}} \times 100$$

$$\text{Echantillons lyophilisés : } [\text{Sucres}]_{(\text{mg}/100\text{g MF})} = [\text{Sucres}]_{(\text{mg}/100\text{g MS})} \times \frac{\% \text{MS}}{100}$$

*MF: si échantillon de pulpe fraîche.

* MS: si échantillon lyophilisé.

Avec Dil: facteur de dilution avant injection (dilution au 50^{ème})

8 PROTOCOLES D'EXTRACTION ET DE DOSAGE DES ACIDES ORGANIQUES

L'année dernière, Gabrielle Fréhaut (stagiaire UTC) avait dosé les acides organiques avec le même appareillage que pour les cations (CIA WATERS) sous FEO inversé. Les acides n'étaient pas extraits de la pulpe puisque le jus était dilué et dosé directement.

Cette année, avec la collaboration CIRAD/DGCCRF, nous avons décidé d'utiliser le même appareillage que pour le dosage des sucres, car il existe une méthode DIONEX de dosage des acides organiques par chromatographie ionique. En se basant sur le protocole du CIRAD Montpellier (code PC0911A) nous avons pu adapter un protocole aux matériels présents au CIRAD-PAA La Réunion, de dosage des anions organiques par chromatographie ionique.

8.1. Extraction des acides organiques de la pulpe de mangue

Les anions organiques et minéraux sont extraits de leur matrice végétale par une solution d'éthanol à 20% dont le pH est inférieur à 3. Les cations sont éliminés par une résine échangeuse de cations sous forme de protons.

Environ 1,5 grammes de pulpe de mangue décongelée ou 0,3 g de pulpe lyophilisée sont pesés dans un ballon de 250 ml dans lequel 50 ml d'acide chlorhydrique éthanoïque 0,005 N à 20% sont ajoutés. Le ballon est disposé sur la rampe d'extraction, pendant 1 heure sous ébullition douce avec agitation et réfrigérant. La solution obtenue est ensuite filtrée sous vide sur membrane de porosité 0,45 μm , sans rinçage. Le filtrat est repris dans une fiole jaugée de 50 ml complétée avec de l'éthanol aqueux à 20% en rinçant la fiole de filtration. Cinq millilitres de cette solution est ajoutée à cinq millilitres d'eau ultra pure (dilution au $\frac{1}{2}$) dans un godet avec environ 1 gramme de résine Amberlite IR120, sous agitation douce pendant 5 minutes. Ensuite la solution est filtrée sous vide sur membrane de porosité 0,22 μm , le filtrat est récupéré dans un godet stocké au congélateur jusqu'à l'analyse chromatographique.

8.2. Dosage des acides organiques

De la même façon que les sucres, nous dosons les acides organiques sur l'HPLC ionique de la DGCCRF. C'est le même appareillage mais la méthode est différente. Nous utilisons une autre colonne pour séparer en gradient les anions minéraux, les acides organiques et les polyphosphates.

8.2.1. Principe de la chromatographie ionique pour les acides organiques

Comme les ions de différentes valences ont des temps de rétention relativement éloignés en chromatographie ionique, le gradient d'éluants (concentration variable au cours de l'analyse) permet de diminuer le temps d'analyse.

Pour abaisser la conductivité de l'éluant avant la détection, un supprimeur automatique est utilisé. Il permet l'utilisation d'un gradient rapide pour séparer les anions inorganiques monovalents et trivalents, et les acides organiques en une seule injection. Le potentiel appliqué au supprimeur automatique est fixé par l'éluant le plus concentré (pour cette application 35 mM de soude). Le gradient varie de 0,5 mM à 35 mM en 25 minutes avec un débit de 2 ml/min.

La détection se fait par conductimétrie, basée sur l'aptitude d'une solution ionique à transporter le courant lorsqu'elle est placée entre deux électrodes de charges différentes. Plus la solution sera riche en ions, plus elle conduira le courant à travers les électrodes "fermant" ainsi le circuit électrique.

Conditions expérimentales:

Appareil **DIONEX**

Colonne: Ion Pac AS11

Phase stationnaire: résine de billes de polystyrène-divnyl-benzène de 13 µm de diamètre recouvertes de microparticules de latex (très hydrophile) de 85 nm de diamètre, porteuses de groupements amine quaternaire.

Pré-colonne: Carbopac PA1 guard

Boucle d'injection de 25 µl

Éluants: eau ultra pure (A), soude 5 mM (B), soude 100 mM (C), Soude 200 mM (D)

Mode d'élution: gradient qui varie de 0,5 mM à 35 mM de soude linéaire en 25 minutes (éluants A, B et C).

Régénération de la colonne: en fin d'analyse avec la soude 200 mM pendant 5 minutes.

Débit d'éluant: 2 ml/min

Détecteur: de type ED40

Limite de pH: de 0 à 14

Suppresseur: ASRS, mode de suppression unique utilisant l'eau comme régénérant, l'éluant est supprimé grâce à une réaction d'électrolyse de l'eau.

Logiciel de pilotage: Peaknet de DIONEX

Étalons: pyruvate, citrate, oxalate, et malate en poudre, pesés pour obtenir une solution à 10 mg/l de chaque étalon.

Avant injection des solutions, ces dernières sont de nouveau diluées au 1/4 (5 ml dans une fiole de 20 ml), soit une dilution finale au 1/8. Il faut environ 22 minutes d'analyse par échantillons.

8.3. Expression des résultats

Les résultats sont obtenus directement en mg par litre de solution, et exprimés en mg d'acides organiques pour 100g de matière fraîche selon les formules (exemple du citrate):

$$[\text{Citrate}]_{(\text{mg}/100\text{g}^*)} = [\text{Citrate}]_{(\text{mg}/\text{L})} \times \text{Dil} \times \frac{50}{1000 \times \text{masse pulpe}} \times 100$$

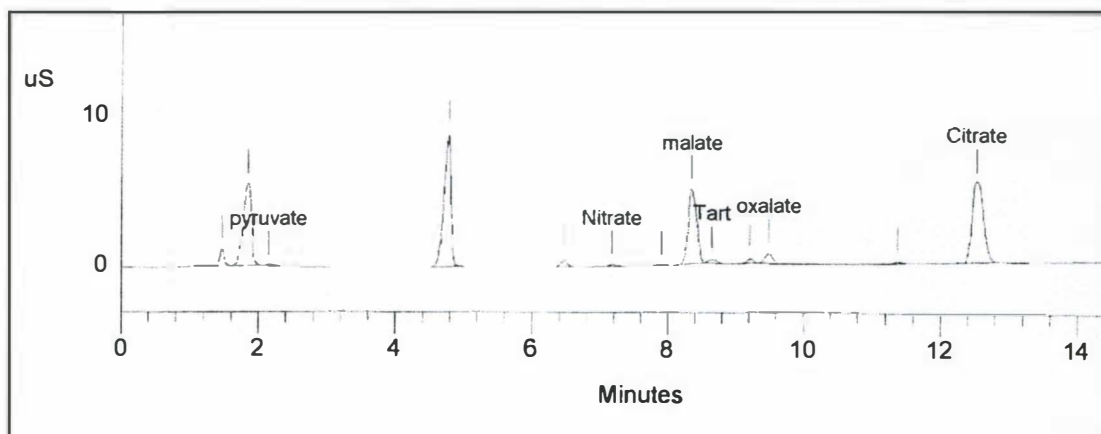
$$\text{Echantillons lyophilisés : } [\text{Citrate}]_{(\text{mg}/100\text{g MF})} = [\text{Citrate}]_{(\text{mg}/100\text{g MS})} \times \frac{\% \text{MS}}{100}$$

*MF: si échantillon de pulpe fraîche.

* MS: si échantillon lyophilisé.

Avec Dil: facteur de dilution avant injection (ici au 1/8ème).

Figure 22: Exemple de chromatogramme obtenu pour un échantillon de pulpe



9 PROTOCOLES D'EXTRACTION ET DE DOSAGE DE L'AMIDON

La méthode utilisée a été développée par le laboratoire des sols du CIRAD La Bretagne pour la pulpe de mangue fraîche ou lyophilisée d'après la méthode EDWARDS modifiée (Cahiers technique de l'INRA, 1994, 35, 5-22).

Le principe de la méthode est un lavage à l'alcool et dispersion de l'amidon en milieu alcalin. Puis une hydrolyse de l'amidon par une amyloglucosidase thermorésistante permet de doser le glucose formé par spectrophotométrie.

9.1. Extraction de l'amidon

8.4. Lavage des sucres

1,5 grammes de pulpe fraîche ou 500 mg de pulpe lyophilisée sont pesés et introduits dans un tube bouché à vis de 50 ml et résistant à l'eau bouillante. Deux lavages à l'alcool sont effectués pour éliminer les sucres solubles et les produits de dégradation de l'amidon. Pour cela 20 ml d'éthanol aqueux à 40% sont ajoutés. Le mélange est mis à agiter pendant 20 minutes. L'éthanol est séparé par centrifugation (5 mn à 1000 rpm), et éliminé. Le culot est repris dans 20 ml d'éthanol et lavé comme précédemment.

8.5. Extraction de l'amidon

Le culot obtenu est placé dans un tube fermé, 10 ml d'eau sont ajoutés et portés 30 minutes au bain-marie bouillant. Les tubes sont refroidis rapidement dans un bain de glace. Dans le tube, 10 ml de potasse 4 M sont ajoutés et agités 30 minutes au culbuteur. Ensuite le mélange est versé dans une fiole jaugée de 50 ml complétée en rinçant le tube à l'eau distillée.

Dans un tube à centrifuger, 1 ml de la solution est ajouté à 10 ml de tampon acétique (acide acétique 0,5 M et chlorure de calcium 0,004 M) et 0,2 ml d'amyloglucosidase (14 AGU/ml Novo Nordisk Bioindustries). Le mélange est incubé à 65°C pendant une heure, puis porté 10 minutes au bain-marie bouillant et refroidi à l'eau. 0,6 ml de potasse 4 M sont ajoutés pour désactiver l'enzyme.

9.2. Dosage du glucose par kit enzymatique

Dans une cuve de spectrophotomètre à usage unique, 0,95 ml d'eau, 0,5 ml de solution n°1 du kit BOEHRINGER MANNHEIM (ref: 716251) et 0,05 ml d'échantillon sont mélangés. Après 3 minutes, la densité optique A1 est lue à 340 nm, puis 20 µl de suspension n°2 du kit sont ajoutés et après 15 minutes, la densité optique A2 est lue.

Le dosage du glucose est étalonné avec une gamme 0, 50, 100, 200 mg/l à partir d'une solution mère de glucose à 1 g/l.

9.3. Expression des résultats

La différence A1-A2 est calculée pour toutes les lectures dont la DO de l'échantillon blanc est aussi soustraite. Le dosage du glucose est étalonné en établissant une régression linéaire passant par zéro à partir de tous les points de la gamme étalon. Les concentrations en glucose de chaque échantillon en sont déduites.

La concentration en amidon est exprimée en g/100g de matière fraîche à l'aide de la formule:

$$[\text{Amidon}]_{(g/100g^*)} = \frac{([\text{Glucose}] / 1000) \times 11,8 \times 50}{\text{Masse} \times 100 \times 0,9}$$

$$\text{échantillons lyophilisés : } [\text{Amidon}]_{(g/100gMF)} = [\text{Amidon}]_{(g/100gMS)} \times \frac{\%MS}{100}$$

* MF: si échantillon de pulpe fraîche.

* MS: si échantillon lyophilisé.

Avec: masse= masse de pulpe pesée

0,9= coefficient de conversion glucose / amidon

10 PROTOCOLES D'EXTRACTION ET DE DOSAGE DE L'ACC

ACC: Acide 1-aminocyclopropane-1-carboxylique

ACC libre: C₄H₇NO₂

ACC total: ACC libre et malonyl-ACC

10.1. Extraction de l'ACC libre

Dans un ballon de 250 ml, 5 grammes de pulpe fraîche décongelée ou 1 g de pulpe lyophilisée sont pesés. Quinze millilitres d'éthanol aqueux à 70% sont ajoutés. La solution est chauffée sous agitation continue sous reflux pendant 45 minutes à l'aide d'une colonne de réfrigération montée sur ballon. Après centrifugation du mélange à 5000 rpm pendant 2 minutes, le filtrat est récupéré et filtré sous vide sur verre fritté. L'éthanol est évaporé sous vide à l'aide de l'évaporateur rotatif (*Rotavapor*) à 60°C. L'extrait est récupéré et transvasé dans un tube falcon de 50 ml.

Ensuite 1 ml d'eau distillée, 1 ml de solution de polyéthylène glycol à 10% et 50 µl d'acide chlorhydrique 2 N sont ajoutés à l'extrait. Le mélange ainsi obtenu est centrifugé à 5000 rpm

pendant 10 minutes, puis neutralisé avec 50 µl de soude 2N. Après agitation, l'extrait est récupéré dans un godet fermé de 15 ml. Le volume de l'extrait brut est mesuré et noté.

10.2. Extraction de l'ACC total

Dans un tube falcon de 15 ml, 2 ml de l'extrait brut précédent sont ajoutés à 400 µl d'acide chlorhydrique 36 N. Après fermeture du tube et agitation au vortex pendant quelques secondes, l'ensemble est mis à incuber à 100°C dans un bain-marie pendant 3 heures.

Après refroidissement à température ambiante, 400 µL de soude à 10 N sont ajoutés pour la neutralisation. Ensuite, à l'aide d'une seringue, le mélange est filtré sur membrane de 0,45 µm et récupéré dans un godet de 15 ml.

10.3. Dosage de l'ACC

L'analyse de l'ACC est basée sur la méthode de Lizada et Yang (1979) modifiée par Sitrit et *al.* (1988). Le principe repose sur le dosage chromatographique de l'éthylène formé par conversion chimique de l'ACC, après addition d'hypochlorite de sodium (NaOCl) en milieu fortement basique et en présence de chlorure de mercure (HgCl₂) comme catalyseur.

Dans chaque pilulier, 500 µl d'extrait, 100 µL de chlorure de mercure 80 mM et 300 µL d'eau sont mélangés (Cheverry, 1991). Les ions mercuriques Hg⁺⁺ sont à la concentration finale de 8 mM, conseillée par Sitrit et *al.* (1988).

Après avoir introduit les 3 constituants, le pilulier est fermé par un bouchon en caoutchouc et maintenu dans la glace. A travers le bouchon, 100 µl du réactif (NaOCl 6% / Na OH 5.6 M) refroidi dans la glace sont injectés. Le réactif est préparé au dernier moment pour avoir un degré de chlore suffisant dans la solution (Rothan, 1987; Cheverry, 1991). Le pilulier est agité 5 secondes au vortex, laissé 2 minutes et 30 secondes dans la glace et de nouveau agité 5 secondes. Un prélèvement d'une aliquote de 0.5 ml du milieu gazeux est effectué à l'aide d'une seringue étanche-gaz et l'éthylène formé est dosé par chromatographie en phase gazeuse (CPG) selon les conditions suivantes:

Conditions expérimentales:

Appareil CPG: HP 5890 séries II

Injecteur: boucle d'injection Valco (6 voies) de 250 µl gaz

Détecteur: détecteur à ionisation de flamme (FID) à 230°C

Four: isotherme à 60°C

Gaz vecteur: Hélium à 11 ml/ minute (10 psi)

Colonne: GS-Q (30 m × 0,53 mm) spéciale gaz.

Une pré-calibration de l'appareil avec une solution étalon d'ACC pur commerciale à 5 µM est nécessaire. Ainsi, une solution d'ACC (5 µM), préparée dans l'acide chlorhydrique 0,1 N pour prolonger la conservation à 4°C, est utilisée avant chaque série de dosage pour vérifier le rendement de la réaction. Le choix de cet étalon est bien évidemment fonction de la teneur en ACC mesuré dans les extraits.

Pour ce dosage (ou cette calibration), 100 µl d'ACC 5 µM sont ajoutés au 100 µl de chlorure de mercure 80 mM et aux 700 µl d'eau distillée, ce qui donne 0,5 nmole d'ACC par pilulier. Sachant que le volume libre du pilulier est de 9.1 ml et que, en théorie, 1 nmole d'ACC doit donner 1 nmole d'éthylène (soit 22,4 nl), la conversion de l'ACC en éthylène doit donner:

Pour l'ACC 5 µM : $(0,5 \times 22,4) / 9.1 = 1.23 \text{ ppm C}_2\text{H}_4$

Les valeurs mesurées d'éthylène pour les échantillons sont donc calculées par cette méthode de calibration externe et exprimées en nmole d'ACC par gramme de pulpe suivant la formule:

$$\text{Teneur en ACC libre} = \frac{[\text{C}_2\text{H}_4] \times \text{Vl} \times \text{Ve}}{22,4 \times m \times \text{Vd}}$$

Avec $[\text{C}_2\text{H}_4]$ = ppm d'éthylène

Vl = Volume libre du pilulier (9,1 ml)

Ve = Volume de l'extrait brut récupéré

m = quantité de pulpe pesée

Vd = volume d'extrait par pilulier (0,5 ml)

Les teneurs en ACC total sont exprimées en nmole d'ACC par gramme de pulpe suivant la formule:

$$\text{Teneur en ACC total} = \frac{[\text{C}_2\text{H}_4] \times \text{Vl} \times \text{Vr} \times \text{Ve}}{22,4 \times m \times \text{Va} \times \text{Vd}}$$

Avec Vr = volume total de la réaction (2,8 ml)

Va = Volume de l'aliquote (2ml)

Il a été réalisé deux répétitions sur deux fruits différents de chaque stade de récolte pour les traitements retenus.

PARTIE 5: RESULTATS ET DISCUSSIONS

Pour tous les graphes et résultats exprimés dans cette partie, la notation utilisée est la suivante:

- ✓ 100H: 100 feuilles par rameau, irrigué.
- ✓ 100S: 100 feuilles par rameau, non irrigué.
- ✓ 10H: 10 feuilles par rameau, irrigué.
- ✓ 10S: 10 feuilles par rameau, non irrigué.

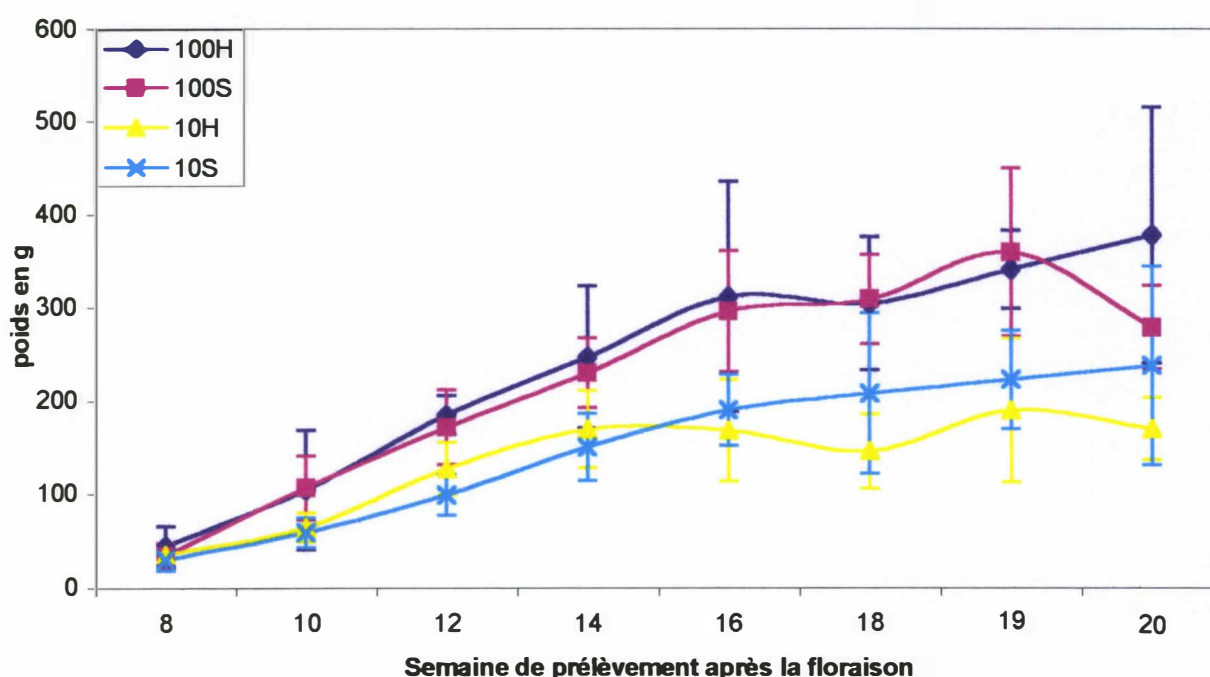
1 CROISSANCE MORPHOLOGIQUE DES FRUITS

1.1. Résultats

La croissance en poids frais des mangues est d'abord rapide puis se ralentit (cf figure 23).

Les différents traitements sont au début très proches. Il y a tout de même une séparation entre les 100 feuilles et les 10 feuilles qui se fait sentir rapidement, puis l'écart s'élargit au cours du temps. L'irrigation ne semble pas être un facteur important pour la croissance des mangues.

Figure 23: Croissance en poids frais des mangues



1.2. Discussion

L'allure de la courbe fait penser que les mangues n'ont pas été récoltées au début de la sigmoïde de croissance, mais plus dans la troisième partie de leur croissance morphologique. C'est à dire à partir du stade adolescent (phase de grossissement cellulaire) et pendant la phase de maturation.

Pour les charges en fruit faibles (100 feuilles/fruit), les mangues sont plus grosses. La sève phoémienne des rameaux chargés en feuilles est supposée plus riche en assimilats carbonés issus de la photosynthèse (Souty et *al.* 1999). Les fruits qui puisent leurs réserves dans ces rameaux accumulent par conséquent plus de nutriments, ce qui explique les poids plus élevés obtenus.

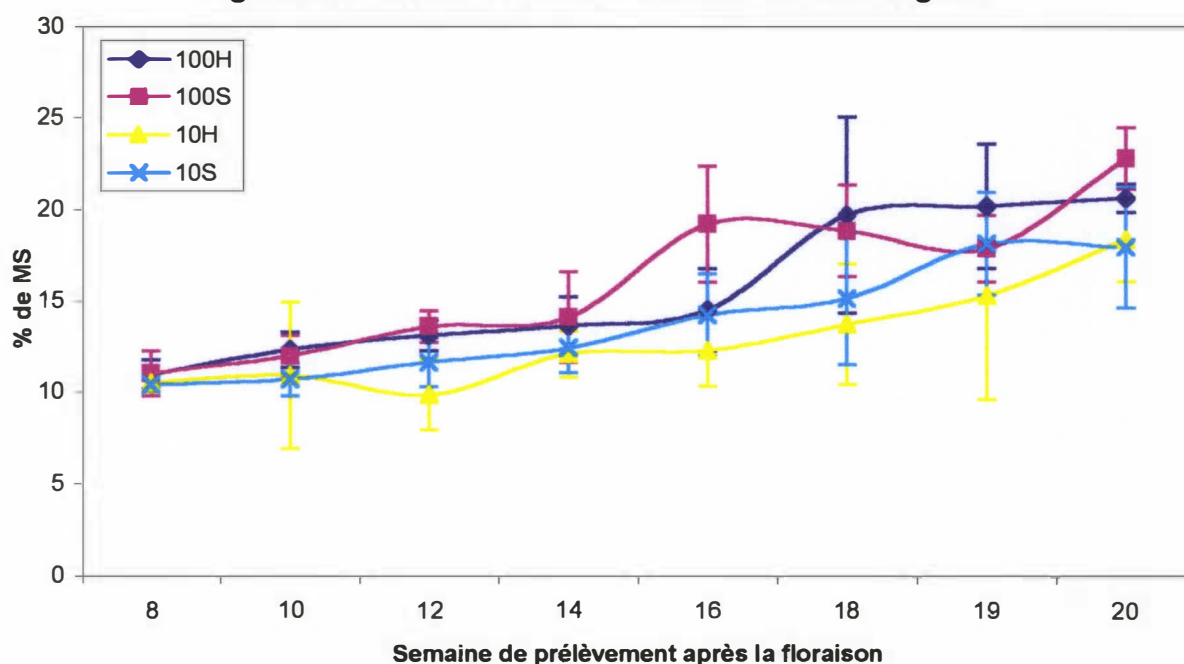
2 EVOLUTION DU TAUX DE MATIERE SECHE

2.1. Résultats

Le taux de matière sèche évolue plus ou moins régulièrement au cours du développement de la mangue (cf figure 24). Le maximum atteint varie entre 17% et 22% selon les traitements. De la même façon que précédemment, nous voyons que les mangues disposant de 100 feuilles sur le rameau ont un taux de matière sèche plus important.

L'allure des courbes des mangues irriguées est plus régulière et elles se ressemblent du point de vue de leur évolution au cours du temps. Par contre les mangues non irriguées présentent des variations du taux de matière sèche assez importantes surtout pour les rameaux disposant de 100 feuilles. Quelle que soit la charge en fruit, les mangues non irriguées ont des taux de matière sèche plus importants que les mangues irriguées.

Figure 24: Evolution de la matière sèche des mangues



2.2. Discussion

Les résultats obtenus sont logiques. Comme pour la croissance en poids frais des mangues, les fruits disposant de 100 feuilles par rameau ont un taux de matière sèche supérieur car la sève phloémienne est plus riche en assimilats carbonés issus de la

photosynthèse que pour les fruits ne disposant que de 10 feuilles par rameau. Les fruits accumulent donc plus de nutriments et moins d'eau.

Les irrégularités des courbes 10S et 100S (sans irrigation) peuvent être expliquées par le stress hydrique subi par les mangues. Les valeurs obtenues pour les traitements 10S et 100S font penser que les mangues ont dû s'adapter aux conditions climatiques au cours du temps. Quand il y a peu d'eau, les rameaux chargés en feuilles leur apportent les assimilats carbonés issus de la photosynthèse par la circulation de la sève élaborée via le phloème. C'est à ce moment là, que le taux de matière sèche augmente car les fruits puisent leurs réserves dans ces rameaux, et ils accumulent donc plus de nutriments et moins d'eau (16^{ème} semaine après la floraison, 100S bien marqué et 10S moins marqué). Par contre quand il pleut, les fruits reçoivent à la fois l'eau et les nutriments par la sève brute qui circule dans le xylème, et les assimilats carbonés de la sève élaborée qui circule dans le phloème.

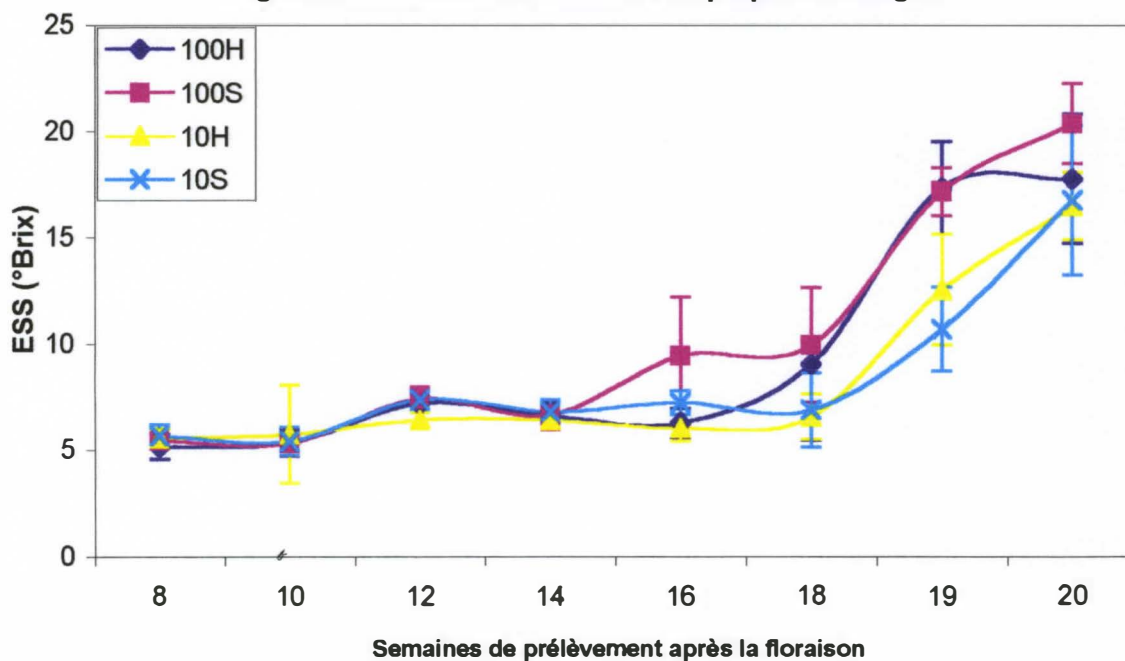
Ces interprétations sont confirmées par la pluviométrie relevée présentée en annexe n°2 (pas de précipitations de la 11^{ème} à la 17^{ème} semaine après la floraison).

3 TENEURS EN GLUCIDES

3.1. ESS

L'extrait sec soluble de la pulpe des fruits augmente lors de leur développement (cf figure 25). Il augmente faiblement jusqu'à la 17^{ème} semaine après la floraison et croît ensuite rapidement.

Figure 25: Evolution de l'ESS de la pulpe de mangue



Les différences entre les traitements sont notables à partir de la 16^{ème} semaine. Les fruits disposant de 100 feuilles ont un ESS plus important que les fruits ne disposant que de 10 feuilles par rameaux.

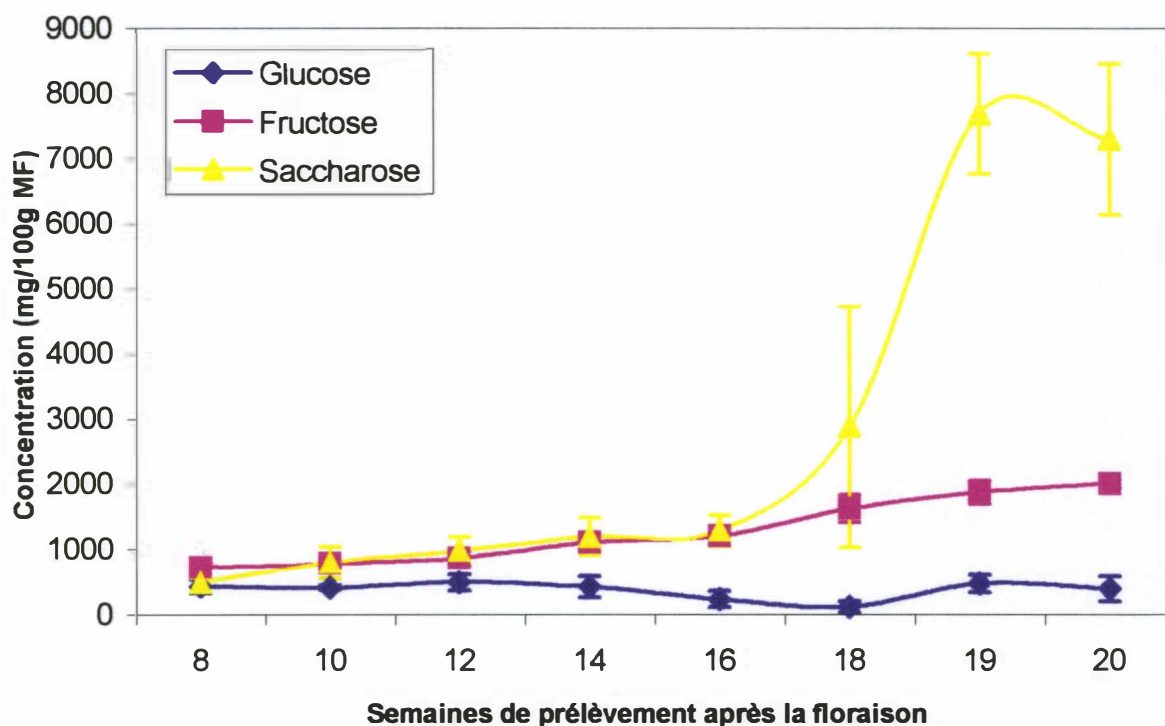
Les différences entre les traitements irrigués ou non irrigués peuvent être corrélés à ceux obtenus pour l'évolution du taux de matière sèche. On voit de la même façon des courbes plus irrégulières que celles des manguiers irrigués. De plus l'augmentation brutale du taux de matière sèche à la 16^{ème} semaine après la floraison est ici retrouvée; de même que des valeurs d'ESS supérieures pour les manguiers non irrigués. Le rôle du stress hydrique sur la matière sèche et l'ESS est effectivement similaire.

3.2. Sucres majeurs

Les sucres majeurs de la mangue ont des comportements différents au cours du développement du fruit (cf figure 26). Le fructose et le saccharose sont les sucres principaux de la pulpe de mangue. Ils sont deux à dix fois plus présents en quantité que le glucose. La concentration en saccharose est dominante tout au long du développement du fruit.

La concentration en glucose a tendance à diminuer. Les teneurs en saccharose et en fructose par contre augmentent. Le fructose augmente régulièrement au cours du développement du fruit avec une augmentation un peu plus prononcée à partir de la 18^{ème} semaine après la floraison. Quant au saccharose, il présente une évolution particulière: une légère augmentation jusqu'à la 16^{ème} semaine après la floraison, puis sa concentration augmente brutalement avec un optimum atteint aux alentours de la 19^{ème} semaine.

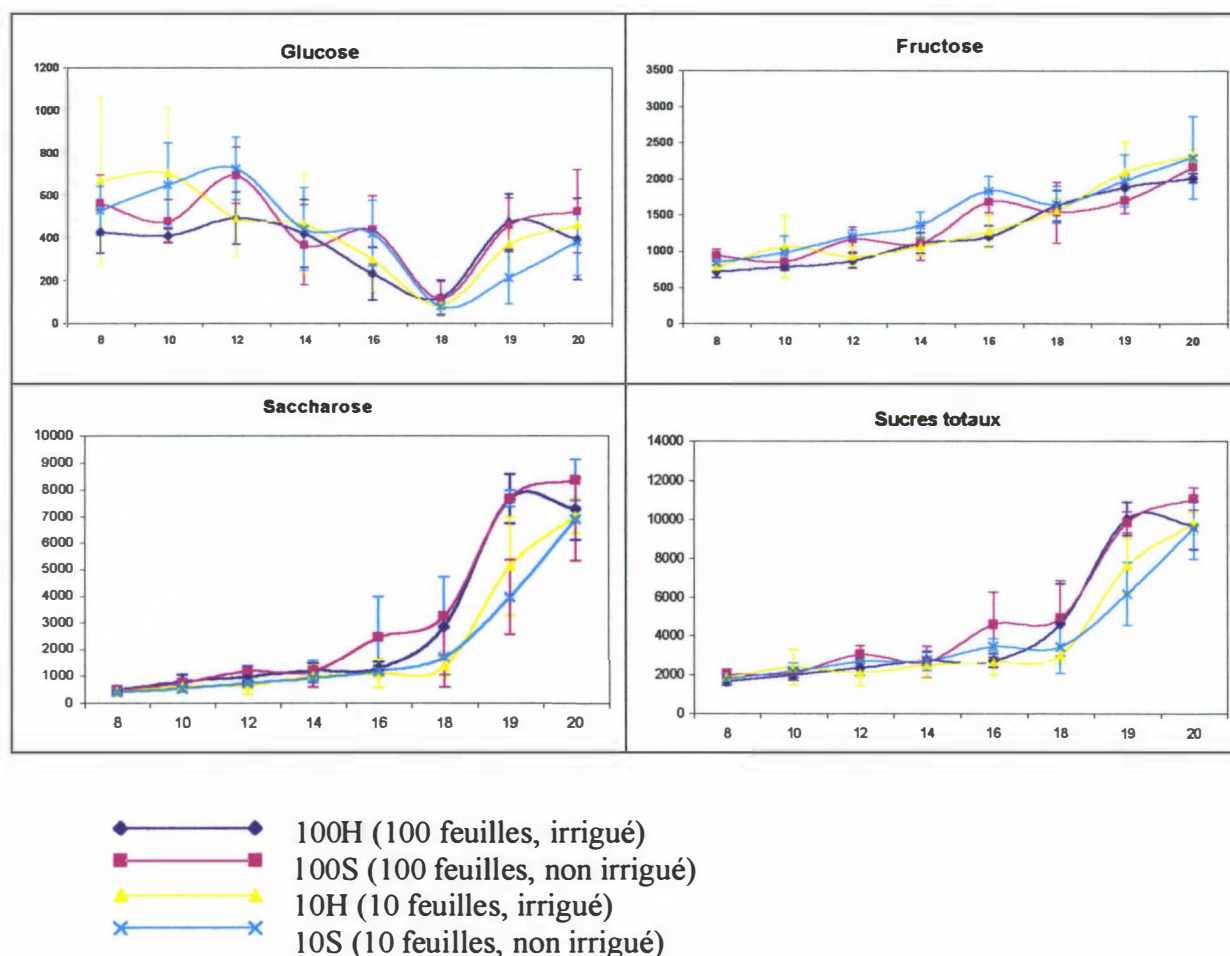
Figure 26: Evolution des concentrations en sucres majeurs dans la pulpe de mangue - 100 feuilles par fruit irrigué



Concernant les différences entre les conditions de culture des mangues, celles disposant de 100 feuilles sur le rameau ont en général une quantité de sucres totaux plus importante que les mangues n'ayant que 10 feuilles (cf figure 27). Cela est particulièrement visible avec le saccharose, composant majoritaire, où les écarts sont importants à partir de la 16^{ème} semaine. Pour les deux autres sucres (glucose et fructose), ces écarts ne sont pas aussi visibles.

Par ailleurs, les courbes de concentrations en sucres des mangues obtenues sans irrigation (100S et 10S) ont des allures similaires et avec des valeurs légèrement supérieures à celles des manguiers irrigués. Les mêmes variations de concentrations sont observées suivant les semaines après la floraison du manguiers selon la méthode de culture irriguée ou non irriguée.

Figure 27: Evolutions des concentrations de glucose, fructose, saccharose et sucres totaux dans la pulpe de mangue, en fonction du stade de maturité et selon les différents traitements de culture. (mg/100g de MF en fonction des semaines de prélèvement après la floraison)



3.3. Amidon

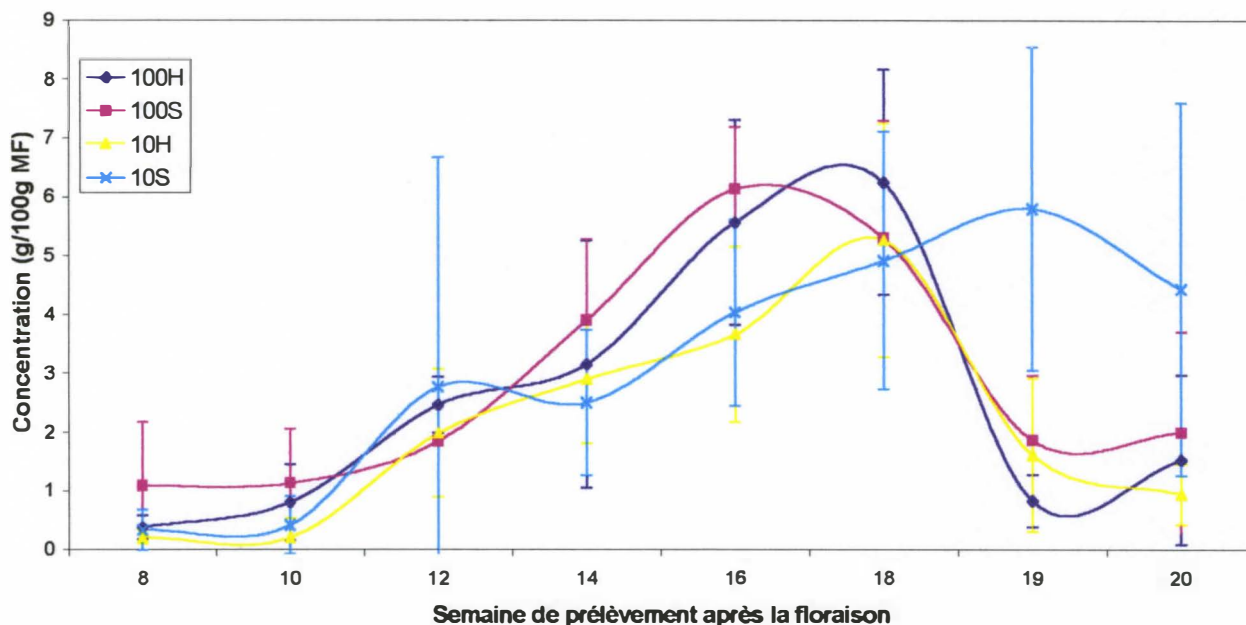
Les résultats obtenus pour l'amidon sont présentés dans la figure 28. Malgré la dispersion des points expérimentaux (notamment pour le traitement 10S), l'allure des courbes renseigne sur l'évolution de la concentration en amidon au cours du développement du fruit.

Les mangues bénéficiant de 100 feuilles par rameau pour leur développement ont, comme pour les résultats précédents, une concentration en amidon plus importante que celles n'ayant que 10 feuilles. Ceci est toujours dû à l'importance du nombre de feuilles apportant les assimilats carbonés aux fruits

D'une manière générale, la concentration en amidon augmente progressivement jusqu'à la 18^{ème} semaine après la floraison, puis chute brutalement pour ensuite se stabiliser à une valeur plus faible.

Par contre lorsque les manguiers n'ont pas été irrigués et avec de surcroît un ratio de 10 feuilles/fruit, l'évolution de la concentration en amidon devient nettement différente. Elle est donc fortement modifiée par le stress hydrique lorsque le deuxième facteur de stress (faible ratio feuilles/fruit) est présent.

Figure 28: Evolution de la concentration en amidon dans la pulpe de mangue



3.4. Discussion

Les glucides s'accumulent dans la mangue au cours de son développement et sa maturation. L'amidon est la principale forme de réserve avec des concentrations moyennes maximales dans la pulpe atteignant 6 g/100g de MF sur fruit vert. Lors de la maturation les sucres sont représentés par le saccharose entre 7 et 9 g/100g MF et le fructose entre 1,7 et 2,5 g/100g MF. Le glucose est présent en faible concentration et a tendance à diminuer au cours du développement des fruits, avec ensuite une légère augmentation au cours de la maturation.

Les recherches biochimiques menées par P.K. Mukerjee (1959) sur plusieurs cultivars montrent aussi les mêmes évolutions avec une augmentation des sucres totaux au cours de la période de maturation du fruit. Ces variations sont dues à l'hydrolyse partielle de l'amidon. Les analyses de Takuji Ito (1997) confirment encore ces résultats d'évolution des sucres réduits et non réduits au cours du développement de la mangue *Mangifera indica* L. "Irwin".

Le saccharose est la forme privilégiée de transport des glucides de cellules à cellules et d'organes à organes, donc des feuilles, où la photosynthèse a lieu jusqu'au fruit. Il est donc logique que le taux de saccharose augmente avec le rapport feuilles par fruit. Ce comportement laisse supposer que le saccharose est une substance de réserve supplémentaire pour la mangue.

Les teneurs en sucres des fruits à maturité varient suivant les espèces, les caractéristiques des sols et les conditions climatiques. L'accumulation des sucres solubles résulte non pas d'une évolution progressive pendant la croissance mais d'une brusque augmentation à la maturation. En parfaite corrélation avec l'évolution de l'amidon, l'augmentation du taux de saccharose est expliquée en grande partie par cette dégradation de l'amidon.

Ces résultats ont déjà été observés et interprétés par V.K. Leley (1989): Pendant la courte période de mûrissement, presque tout l'amidon est hydrolysé, le fructose et le glucose formé vont servir à la formation de saccharose dont la concentration va brusquement augmenter dans la pulpe de mangue.

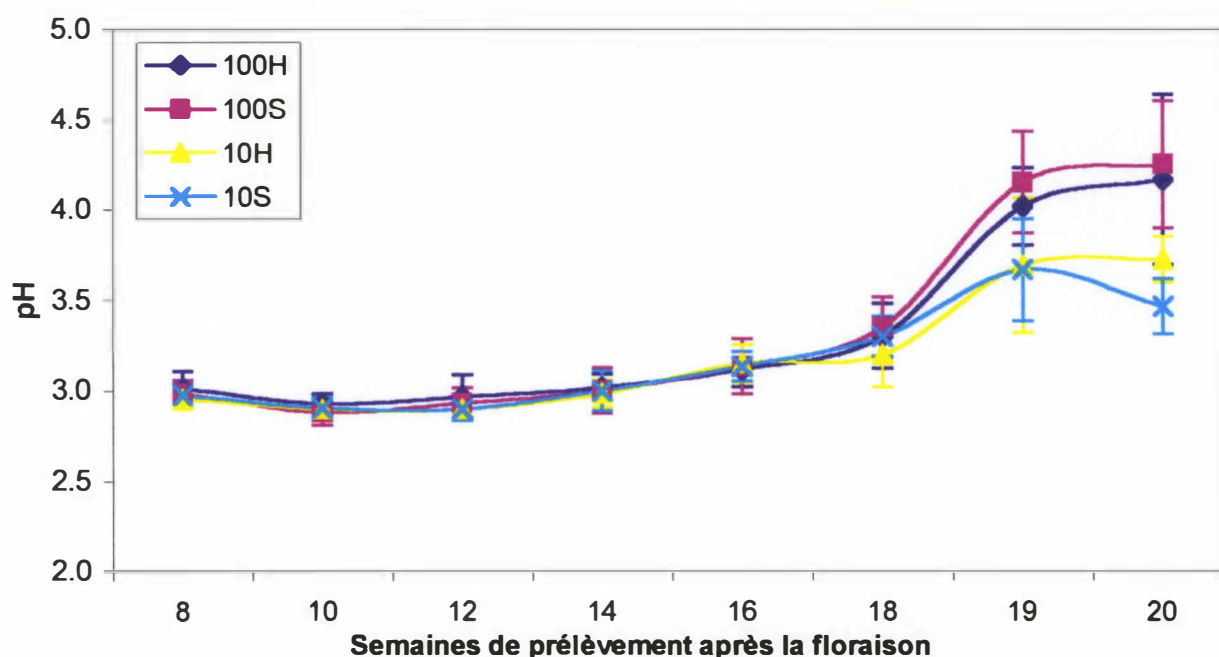
La corrélation entre la période d'augmentation du saccharose et de diminution de l'amidon font penser que la maturation (crise respiratoire et changements métaboliques) a lieu entre la 16^{ème} et la 19^{ème} semaine après la floraison. Pour les mangues ne disposant que de 10 feuilles par fruit, la maturation est visiblement perturbée puisque l'enrichissement en saccharose et la régression de l'amidon sont décalées et à priori plus faibles.

4 PH, ACIDITE TITRABLE, TENEUR EN ACIDES ORGANIQUES

4.1. pH

Le pH des fruits augmente en fonction de leur stade de maturité (cf. figure 29). Le pH n'augmente pratiquement pas jusqu'à la 17^{ème} semaine, il stagne entre les valeurs 2,8 à 3,2 pour tous les traitements. Ensuite, à partir de la 18^{ème} semaine après la floraison, le pH croît rapidement pour atteindre des valeurs maximales et stagnantes à partir de la 19^{ème} et 20^{ème} semaine.

Figure 29: Evolution du pH de la pulpe de mangue



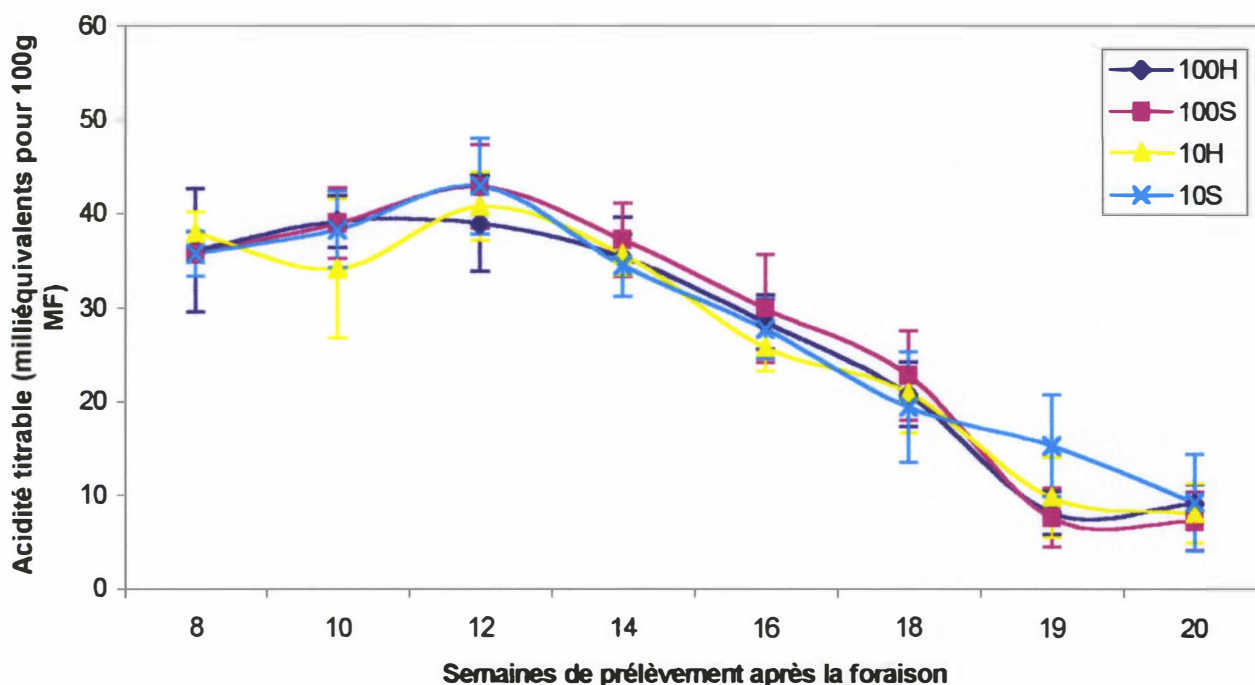
Il semble que les traitements influencent le pH des fruits. Lors de la phase d'augmentation du pH, l'écart est creusé entre les mangues cultivées avec 100 feuilles par rameau et celles avec 10 feuilles par rameau. Les "100 feuilles" ont une augmentation de pH plus importante.

Par contre, les différences de pH entre les traitements irrigués ou non irrigués ne sont pas véritablement visibles. Pour un ratio feuille/fruit, les courbes sont quasiment superposables à l'exception de la chute de pH observée à la 20^{ème} semaine pour le traitement non irrigué et avec un faible ratio feuille/fruit (10S).

4.2. Acidité titrable

Après une légère augmentation dans les phases précoces du développement, l'acidité diminue régulièrement. En phase de maturation, la perte d'acidité s'accroît puis se stabilise.

Figure 30: Evolution de l'acidité titrable dans la pulpe de mangue



Les différents traitements n'influencent pas vraiment la diminution de l'acidité titrable au cours de la croissance des mangues. Seul le traitement 10S (10 feuilles, non irrigué) a un comportement qui diffère des trois autres à la maturation, confirmant une perturbation de l'évolution en maturation des fruits.

Notons cependant que si une différence de pH est observée en cours de maturation (après la 18^{ème} semaine) selon les ratios 100 ou 10 feuilles/fruit, cette différence d'évolution n'est pas répercutée ici sur l'acidité titrable des fruits.

4.3. Acides organiques

4.3.1. Conclusions sur la méthode

La séparation et le dosage des acides organiques par chromatographie ionique sont beaucoup plus précis qu'avec l'électrophorèse capillaire utilisée l'année dernière.

Cette méthode ajoute des manipulations car il faut extraire les acides organiques de la pulpe de mangue.

L'intégration des pics se fait par rapport à des étalons externes. Ces derniers réinjectés comme un échantillon ne donnent que des variations de l'ordre de 5% par rapport à leur propre concentration ($10 \text{ ppm} \pm 5\%$), ce qui est très acceptable (entre 5 et 10% l'an passé avec la CIA).

Le mode d'élution par gradient facilite l'analyse des acides organiques car il diminue le temps de séparation sans que les pics ne fusionnent. La mise au point de la méthode est entièrement informatisée (*Peak net* De Dionex), et sa mise au point est assez facile.

4.3.2. Résultats

Disposant de 4 étalons, nous avons pu doser les 4 acides organiques majoritaires extraits de la pulpe de mangue:

- ✓ Acide pyruvique
- ✓ Acide oxalique
- ✓ Acide malique
- ✓ Acide citrique

Parmi ceux-ci, ceux dont les concentrations sont les plus fortes et varient le plus sont les acides citriques et maliques (cf. figure 31).

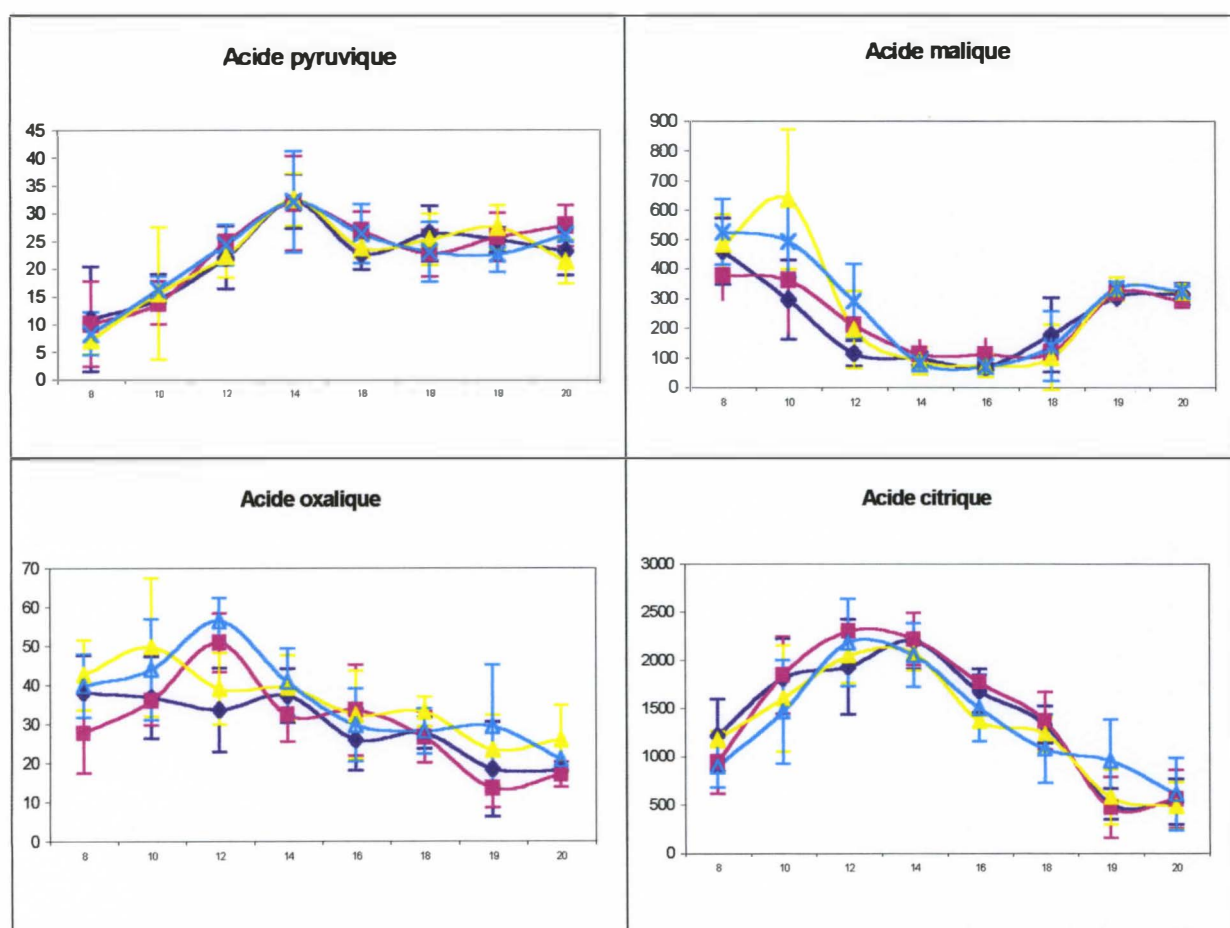
L'acide pyruvique est un indicateur du bon déroulement du cycle de Krebs, et son évolution au cours du développement de la mangue est assez régulière pour l'ensemble des traitements. Au cours du temps, il augmente progressivement jusqu'à atteindre un maximum aux alentours de $32 \text{ mg}/100 \text{ g}$ de matière fraîche. Ensuite il diminue légèrement et reste constant jusqu'à la fin de la maturation (entre 25 et $30 \text{ mg}/100 \text{ g}$ selon les traitements). Il n'y a donc pas de différences notables entre les traitements (pas d'influence du ratio feuilles/fruit, ni de l'irrigation).

L'acide oxalique présente des profils assez irréguliers avec une tendance à diminuer au cours du temps. Ce qui est remarquable à noter, c'est qu'indifféremment du ratio feuilles/fruit, nous notons surtout une différence de concentration en acide oxalique en fonction de l'irrigation. Pour les mangues irriguées (100H ou 10H), les teneurs sont quasiment identiques et baissent progressivement de 45 à $15 \text{ mg}/100 \text{ g}$ de pulpe. La concentration en acide oxalique des mangues non irriguées (100S et 10S) sont supérieures à celles des mangues irriguées et l'évolution de cette concentration est aussi différente. Nous notons une augmentation de la 8^{ème} à la 12^{ème} semaine ($60 \text{ mg}/100 \text{ g}$ de pulpe) puis une diminution progressive jusqu'à la 19^{ème}-20^{ème} semaine (15 à $20 \text{ mg}/100 \text{ g}$ de pulpe). Ainsi si le ratio feuilles/fruit ne semble pas modifier l'évolution de cet acide, l'irrigation y joue apparemment un rôle.

La concentration en acide malique présente une évolution similaire pour tous les traitements. Elle augmente pour le traitement 10H et stagne pour les trois autres au début du développement du fruit, puis diminue jusqu'à la 12^{ème} semaine après la floraison. Ensuite la concentration en acide malique reste constante jusqu'à la 18^{ème} semaine, puis elle augmente pour atteindre des valeurs finales comprises entre 0,28 et 0,35 g/100 g de MF.

La teneur en acide citrique au cours du temps montre un comportement inverse de celui de l'acide malique. Elle augmente jusqu'à la 12^{ème} semaine après la floraison pour atteindre un maximum compris entre 1,5 et 2,5 g/100g de MF. Puis la concentration en acide citrique de la pulpe de mangue diminue jusqu'à la fin de la maturation avec des teneurs comprises entre 0,3 et 1 g/100g de MF. Les différences entre les traitements ne sont pas très prononcées. L'irrigation ne semble pas avoir d'effet sur la concentration en acide citrique de la pulpe de mangue. Nous n'observons seulement qu'une petite augmentation des teneurs en acide citrique pour les mangues avec un ratio 100 feuilles/fruit, en comparaison avec les 10 feuilles/fruit (pas de différences significatives mises en évidence par l'analyse statistique cf. annexe n°1).

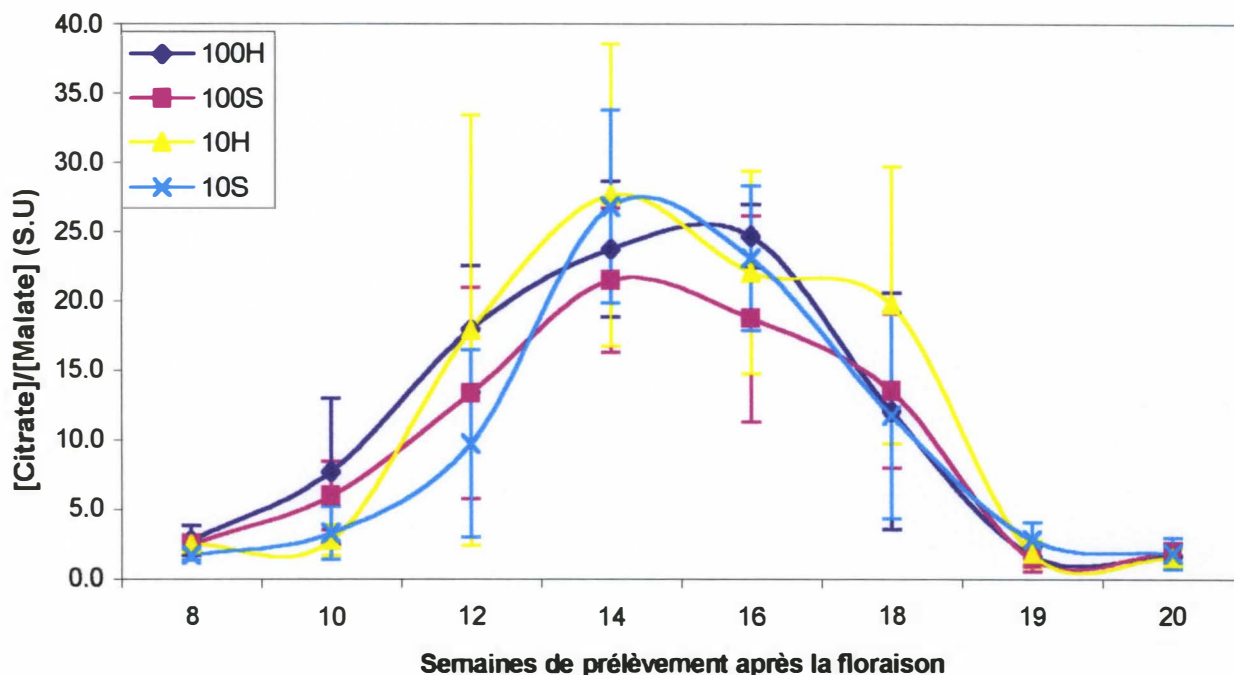
Figure 31: Evolution des acides organiques dans la pulpe de mangue en fonction de son stade de maturité à la récolte (mg/100 g de MF en fonction des semaines de prélèvement après la floraison)



- ◆ 100H (100 feuilles, irrigué)
- 100S (100 feuilles, non irrigué)
- ▲ 10H (10 feuilles, irrigué)
- × 10S (10 feuilles, non irrigué)

Le rapport des concentrations en acide citrique sur acide malique est intéressant à suivre au cours de l'évolution du fruit (cf. figure 32). Ce rapport a souvent été calculé dans les études précédentes de caractérisation biochimique de la mangue, il est donc judicieux de le comparer aux résultats déjà publiés. Le rapport citrate/malate suit une dynamique d'augmentation progressive au cours du développement et de diminution au cours de la maturation. De même que pour les courbes d'acide malique et d'acide citrique prises indépendamment, nous ne notons pas de différences significatives d'évolution de ce rapport citrate/malate en fonction des traitements.

Figure 32: Evolution du rapport citrate/malate dans la pulpe de mangue



4.4. Discussion

Les valeurs de pH, acidité titrable et acides organiques sont logiques. La teneur en acides de la pulpe de mangue diminue au cours de son développement.

D'après V.K. Leley, les changements d'acidité sont les plus prononcés dans la pulpe du cultivar "Alphonso" que dans les autres parties du fruit. Il y a une légère augmentation de l'acidité au début du développement puis elle diminue graduellement, avec une chute brutale au moment de la sénescence du fruit. Il trouve aussi que la courbe de l'acidité titrable est l'inverse de la courbe de pH. De même, S.C. Sarker and A.A.A Mushi(1981) observe la même allure de la courbe d'acidité titrable en fonction du stade de maturité de la mangue "Fazli" et "Gopalbhog". Ils ont aussi étudié la concentration en acide citrique au cours du développement et trouvent aussi une augmentation progressive suivie d'une diminution jusqu'à la valeur initiale. Toutes ces observations sont également corroborées par nos travaux. Cependant dans le cas des fruits stressés (10 feuilles/fruit), la valeur de pH reste faible. La quantité de protons libre reste donc élevée, ce qui sous entendrait une légère déviation du métabolisme.

Le rapport citrate/malate a surtout été étudié après la récolte des fruits et en relation avec le rapport sucres/acides pour essayer de qualifier les arômes et les saveurs des mangues mûres de différents cultivars. Y. Selvaraj (1989) montre que l'acide citrique diminue et que l'acide malique augmente au cours du mûrissement, ce qui explique la diminution du rapport citrate/malate dans la pulpe de mangue mûre. La mangue "Alphonso" avec un arôme important a un haut rapport Citrate/malate (3,02 SU). Quand le rapport citrate/malate diminue, l'arôme diminue aussi. Au contraire, le rapport sucres/acides augmente lorsque l'arôme diminue. Les relations entre l'arôme et les paramètres biochimiques sont des facteurs importants afin d'établir des relations entre les conditions de culture et la qualité du fruit pour le consommateur. Ces résultats sont encore une fois confirmés par S.K Mitra et E.A Baldwin (1997) qui ont aussi étudié la présence des acides organiques au cours du mûrissement et après récolte des mangues "Alphonso" et "Keitt". Ils trouvent que la concentration en acide malique augmente au cours du mûrissement avec un maximum avant la crise climactérique, et décline après.

Dans nos travaux, la teneur en acide malique commence à augmenter à partir de la 16^{ème} semaine, parallèlement à une baisse en acide citrique. Avec les résultats précédemment obtenus pour les sucres, l'entrée en maturation peut donc être datée à partir de la 16^{ème} semaine après la floraison pour ces mangues à La Réunion.

Les résultats obtenus pour les acides organiques nous permettent de dire que les contraintes des conditions de culture (nombre de feuilles, irrigation) n'ont pas un impact important sur les teneurs en acides organiques majoritaires, et à fortiori sur le cycle de Krebs.

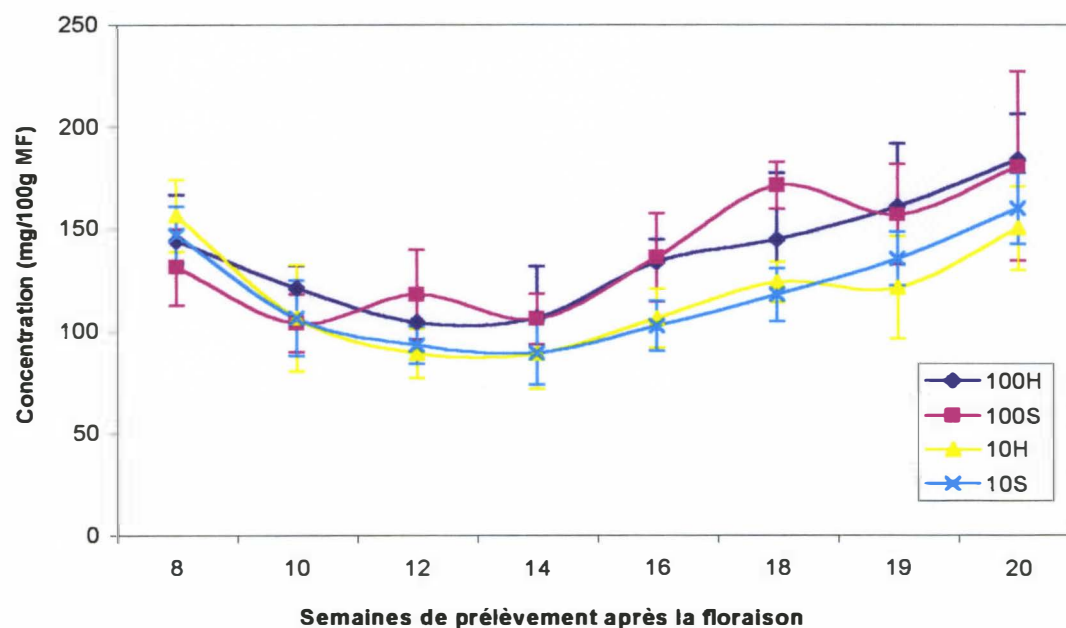
Cependant, il semble important de connaître la composition biochimique en acides organiques de la mangue pour évaluer son arôme et sa qualité.

5 TENEURS EN MINERAUX

5.1. Le potassium

Le potassium dans la pulpe diminue jusqu'à la 12^{ème} semaine après la floraison, puis augmente pendant le développement de la mangue (cf. figure 33).

Figure 33: Evolution de la concentration de K⁺



Après 10 semaines, les différences entre les traitements sont visibles. Les mangues disposant de 100 feuilles par rameau ont plus de potassium que celles ne disposant que de 10 feuilles par rameau. En ce qui concerne l'influence de l'irrigation, il est difficile de conclure. La courbe du traitement 100S montre des variations importantes, ce qui peut être dû à la quantité d'eau présente dans les fruits (par la circulation de la sève brute) en fonction des conditions climatiques (effets de concentration ou de dilution), confirmés par les variations de pluviométrie (cf. annexe n°2).

5.2. L'ammoniac, le calcium, le sodium et le magnésium

Ces quatre cations sont en quantité moins importante que le potassium. Leur évolution au cours du développement de la mangue a des profils différents (cf. figure 34).

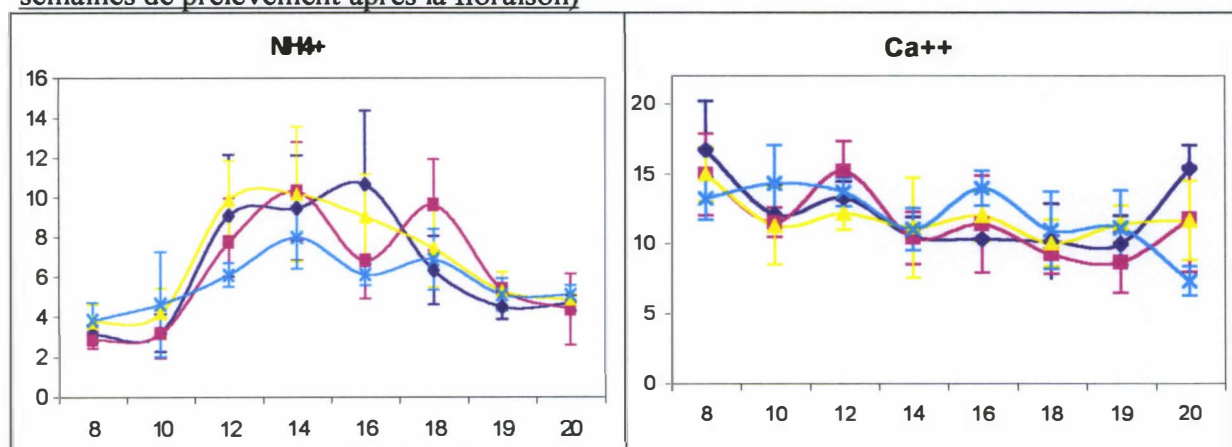
L'ammoniac a tendance à augmenter au début du développement de la mangue (accroissement progressif entre la 10^{ème} et la 16^{ème} semaine) et diminue au cours de la maturation. Sa concentration finale est homogène pour tous les traitements, de l'ordre de 4 mg/100 g de MF à la 20^{ème} semaine. On ne peut en conséquence pas conclure sur l'influence de tel ou tel traitement; les variations restant dans le même ordre de grandeur.

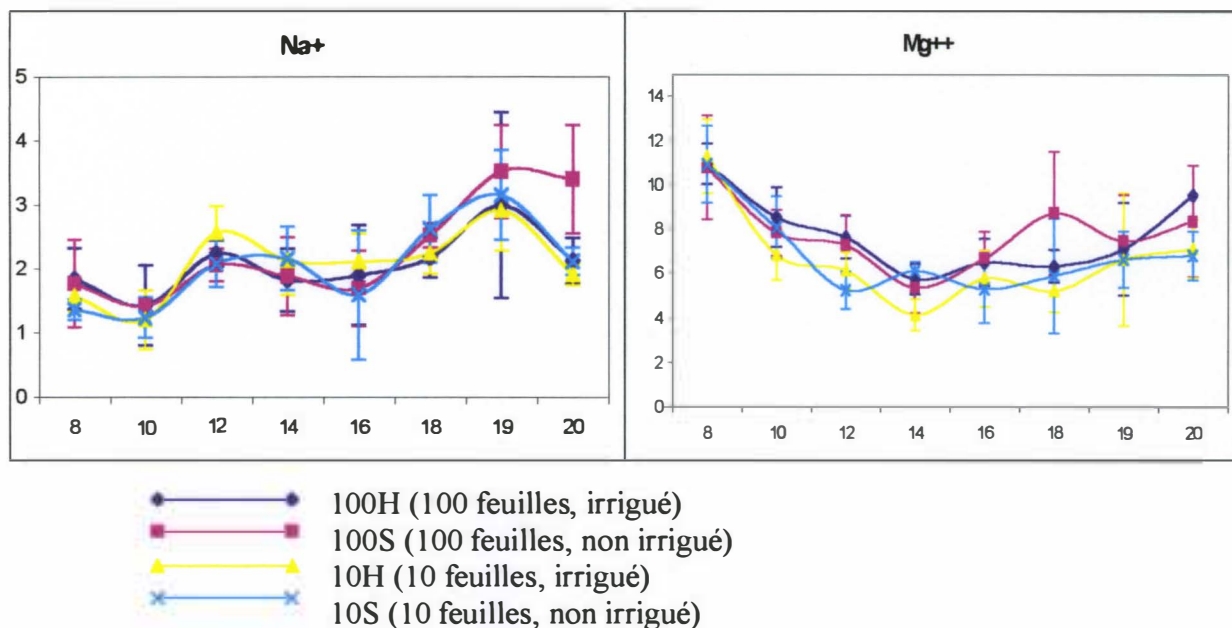
Pour le calcium, la teneur a tendance à diminuer de quelques milligrammes au cours du temps. Les différences entre les traitements ne sont pas significativement apparentes, sauf pour le traitement 10S (10 feuilles non irrigué) dont la teneur en calcium diminue légèrement à la 20^{ème} semaine après la floraison (alors que pour les autres traitements de culture, la teneur en calcium augmente).

Les quantités de sodium sont très faibles. Les variations de concentrations observées sont différentes des résultats obtenus l'an passé. En 2001, la concentration de sodium se stabilisait à partir du quatrième stade de maturité, alors que cette année, la teneur en sodium oscille entre 1 et 3,5 mg/100 g de MF et augmente au cours du développement du fruit.

La teneur en magnésium a tendance à diminuer au cours du développement du fruit et à augmenter au cours de la maturation. Dans l'ensemble, nous notons des teneurs supérieures en magnésium dans les mangues ayant 100 feuilles par rameau, indépendamment de l'irrigation.

Figure 34: évolution de la teneur en ammoniac, calcium, sodium et magnésium dans la pulpe de mangue en fonction de son stade de maturité à la récolte (mg/100 g de MF en fonction des semaines de prélèvement après la floraison)





5.3. Discussion

Les minéraux sont transportés du sol vers les feuilles par la sève brute via le xylème et ensuite redistribués des feuilles vers les fruits.

Les traitements n'ont pas vraiment d'influence sur les teneurs en cations de la pulpe de mangue, si ce n'est une fluctuation plus importante des plants non irrigués.

Des études sur la soja ont montré que le potassium et le magnésium est d'abord transporté jusqu'aux feuilles par la sève brute via le xylème, puis jusqu'aux fruits par la sève élaborée dans le phloème (Nooden, 1988, cité par Simmons et *al.*, 1998). Pour ces minéraux plus mobiles, on retrouve le même système dans la mangue où leur teneur dépend de la charge en fruit avec un flux migratoire plus important dans le cadre des 100 feuilles.

Le calcium en renforçant les structures membranaires peut ralentir le ramollissement des fruits (Abott et *al.* 1989, Battey 1990) et participe donc à la préservation de la qualité. Dans nos conditions de culture, il semble que seul le traitement 10S (10 feuilles, non irrigué) ait influencé les teneurs en calcium surtout à la fin de la maturation.

6 L'ACC

6.1. Dosage de l'ACC

ACC: Acide 1-aminocyclopropane-1-carboxylique

La méthode d'extraction et dosage chromatographique de l'ACC nous permet de mesurer finement la teneur en ACC (libre et total) dans les pulpes de mangues fraîches et lyophilisées. Ces dosages sont des essais préliminaires pour se préparer à la prochaine récolte de mangue. Nous avons donc testé des conditions extrêmes (100 feuilles irrigué, et 10 feuilles non irrigué) pour voir si les conditions de culture avaient une influence sur les teneurs en ACC et donc sur le métabolisme de maturation.

La courbe d'ACC libre pour le traitement 100 feuilles irrigué montre un pic à la 19^{ème} semaine après la floraison (cf. figure 35). Pour les mangues issues du traitement 10 feuilles non irrigué, l'ACC libre reste quasiment indécélable tout au long du développement (cf. figure 36). Il n'y a aucun pic visible.

En ce qui concerne l'ACC total, une augmentation est observable à la 12^{ème} semaine après la floraison pour les deux types de traitements. Alors que la courbe d'ACC total (ACC libre + M-ACC) suit la même évolution de celle de l'ACC libre pour le traitement 100H (pic à la 19^{ème} semaine), celle de l'ACC total pour le traitement 10S est totalement différente. En effet, si l'ACC libre de ces dernières mangues reste au niveau zéro tout au long du développement du fruit, ils accumulent de plus en plus d'ACC complexé sous la forme Malonyl-ACC. Le teneur en M-ACC augmente progressivement à partir de la 14^{ème} semaine, avec cependant des fluctuations importantes vers la 19^{ème} semaine.

La différence entre les traitements est marquée surtout par la dispersion des résultats. Les mangues disposant de 100 feuilles par rameau irrigué ne montrent pas une dispersion importante. Les teneurs sont cohérentes entre ACC libre et ACC total. Mais pour les mangues ne disposant que de 10 feuilles par rameau, les écarts types calculés sont importants. On ne peut, en conséquence, situer précisément l'optimum du M-ACC (vraisemblablement entre la 18^{ème} et la 20^{ème} semaine)

Ceci montre que les rameaux avec 10 feuilles par fruit non irrigué donnent des mangues qu'il est difficile de qualifier selon leur stade de maturité. Ces mangues ne sont pas homogènes dans leurs caractéristiques biochimiques aux différents stades de prélèvement. Le seul point visible est que ces mangues ne renferment pas d'ACC libre.

Figure 35: -100 Feuilles irrigué-

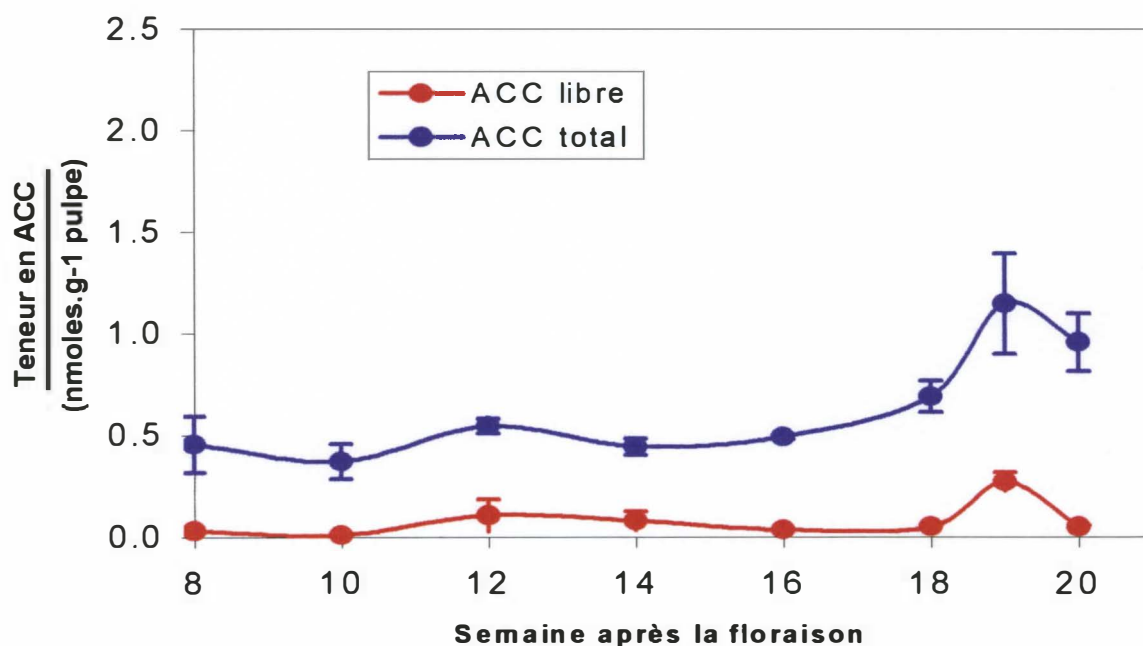
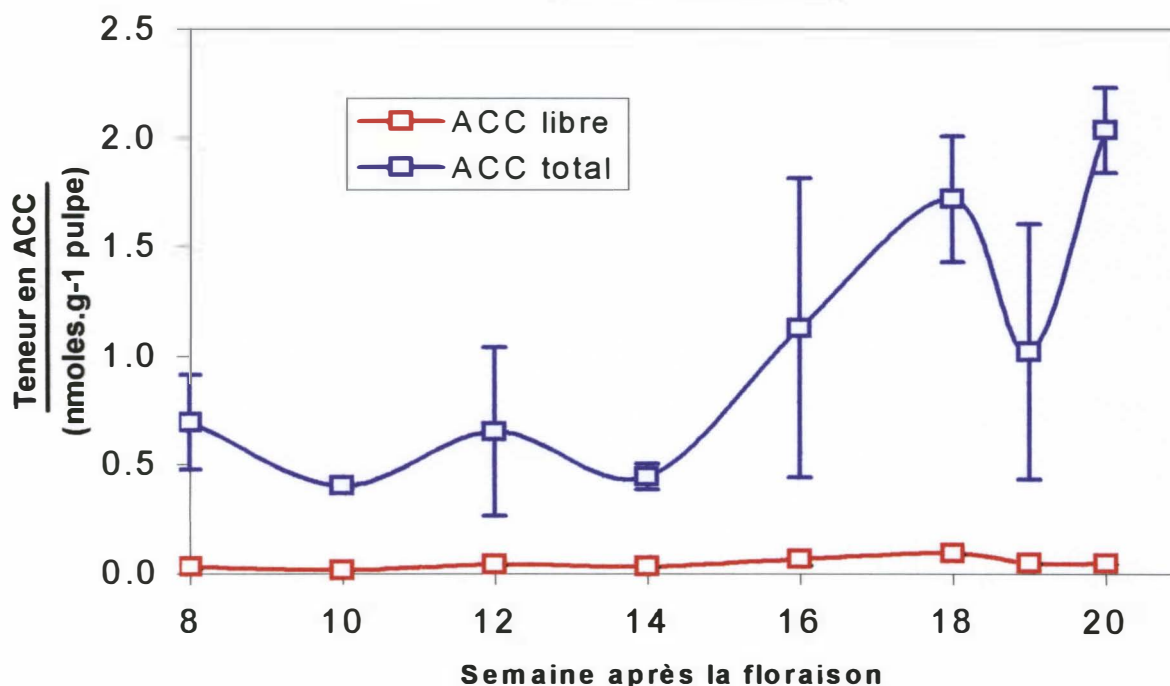


Figure 36: -10 Feuilles non irrigué-



6.2. Discussion

Les différences observables entre les mangues ne disposant que de 10 feuilles, non irriguées, et celles disposant de 100 feuilles, irriguées, peuvent être interprétées par une perturbation de la cascade métabolique de la synthèse d'ACC (cf. figure 16: Biosynthèse de l'éthylène).

Pour le traitement 100 feuilles, la synthèse d'ACC libre et l'augmentation simultanée d'ACC total à la 18^{ème} semaine après la floraison prouvent que ces mangues ont un potentiel de maturation important. La cascade métabolique de synthèse d'ACC n'est pas perturbée. L'ACC libre et le malonyl-ACC (ACC de réserve) sont synthétisés à la 18^{ème} semaine après la floraison et vont permettre aux mangues une maturation convenable.

Pour le traitement 10 feuilles, l'ACC libre n'est pas décelable alors que l'ACC total (donc à priori le M-ACC) augmente progressivement à partir de la 14^{ème} semaine. Au vu de ces résultats, il semble que la chaîne métabolique de l'ACC soit modifiée. Seul le malonyl-ACC est détecté dans ces mangues, sous une forme qui n'est plus disponible pour la production d'éthylène (Latché et al. 1995).

Soit l'ensemble de l'ACC est converti en M-ACC, soit la fraction libre est directement convertie en éthylène sous l'action de l'ACO (l'ACC oxydase), et les quantités sont trop faibles pour que l'on observe un enrichissement. Dans les deux cas, le potentiel de maturation des mangues cumulant les stress est perturbé.

D'après M. Souty et M. Génard (1998), chez la pêche, le déclenchement de l'émission éthylénique apparaît plus tôt chez les fruits sans conditions stressantes, et l'intensité du dégagement est fortement dépendante de la quantité en assimilats. Nos travaux montrent la même tendance pour la mangue, ce qui est encourageant.

Ces résultats permettent par ailleurs de valider la méthode d'extraction et de dosage de l'ACC dans la pulpe de mangue. Ils montrent aussi que l'ACC est un marqueur de la maturation représentatif des conditions de culture des mangues.

7 DISCUSSION GENERALE DE L'ETUDE

L'étude menée cette année apporte de nouvelles données pour comprendre l'élaboration de la qualité des mangues à La Réunion. Les résultats décrivent le comportement de la mangue au cours de sa croissance. Ils confirment et apportent des éléments supplémentaires à l'étude menée l'an passé par Gabrielle Fréhaut.

7.1. Effets des traitements

Cette année, en plus des variations des conditions en alimentation carbonée, l'irrigation des manguiers a été un facteur de stress supplémentaire lors du développement des fruits..

L'alimentation carbonée influe sur la croissance morphologique et l'accumulation des composés biochimiques dans la mangue. La teneur des fruits en matière sèche, saccharose, amidon et potassium est plus grande lorsque les fruits sont issus des traitements à haut ratio feuilles/fruit (voir analyse statistique en annexe). Par contre ces conditions de culture n'influence pas à priori le déroulement du cycle de Krebs (pas de différences significatives des teneurs en acides organiques selon les traitements).

Pour la plupart des résultats relevés, il semble que l'irrigation ne soit pas un facteur de stress majeur pour les manguiers. Il faut relativiser ce résultat car la pluviométrie est importante lors de la croissance des mangues et influence beaucoup la notion de non irrigué. Par contre le cumul des facteurs de stress (fourniture en assimilats carboné et hydrique) semble altérer le bon développement et la maturation de la mangue. Pour la plupart des caractéristiques biochimiques enregistrées (pH, acidité titrable, amidon, sucres et calcium), les mangues issues du traitement 10S montrent des particularités dans leur évolution en cours de maturation.

7.2. La maturation

La maturation est particulièrement intéressante à considérer chez les fruits charnus car la chair du fruit est alors le siège de changements métaboliques très importants, qui font que les fruits deviennent doux, colorés, juteux, perdant très souvent leur acidité et leur astringence et augmentant leur production d'arômes. La maturation ne débute qu'après que le fruit ait atteint un développement suffisant (ontogénèse) et correspond à l'établissement d'un nouvel état physiologique.

La mesure de la respiration permet de faire apparaître chez de nombreux fruits une augmentation importante de la respiration lors du déclenchement de la maturation. Cette hausse brutale s'appelle la crise climactérique. La crise climactérique est caractérisée par une forte augmentation de la respiration, et s'accompagne d'une forte production d'éthylène ("hormone de maturation"). Le précurseur de l'éthylène est l'ACC sous forme libre (Acide 1-aminocyclopropane-1-carboxylique) que nous avons pu doser dans la pulpe de mangue.

Grâce aux changements nets des teneurs en saccharose, amidon et ACC, la crise climactérique des mangues peut être datée entre la 16^{ème} et la 19^{ème} semaine après la floraison. L'influence des traitements est grande sur la maturation puisque le stress induit par le faible apport en assimilats carbonés dans les fruits (c'est à dire faible ratio feuilles/fruit) et l'absence d'irrigation dévie la chaîne de biosynthèse de l'éthylène vers la forme majoritaire de réserve: le M-ACC (malonyl-acide 1-aminocyclopropane-1-carboxylique). Ces fruits n'ont pas un potentiel de maturation important puisque l'ACC libre est absent et ne peut donc pas être convertie en éthylène, composé primordiale pour nombres de réactions métaboliques en cascade (accélération et auto-régulation des mécanismes de maturation, action ciblée sur la synthèse des arômes et autres constituants biochimiques du fruit).

7.3. Perspectives des recherches

Ces résultats, confirmés par l'étude de M. Souty (1998) sur la pêche, doivent être complétés par des mesures de respiration des fruits pour situer dans le temps la crise respiratoire et l'émission d'éthylène.

A la prochaine saison, l'activité respiratoire sera suivie au jour le jour en fonction des stades de récolte étalés entre la 15^{ème} et la 17^{ème} semaine après la floraison, pour une technique de conservation donnée. Les mesures de CO₂, O₂ et d'éthylène sur fruits frais seront complétés par des analyses de pulpe (composition biochimique et ACC).

CONCLUSION

La caractérisation biochimique de la mangue en fonction de son stade de maturité utilise de nombreuses méthodes analytiques, permettant de mettre en évidence l'impact des conditions de culture sur la morphologie, la composition et l'évolution du fruit.

La mise au point d'une technique d'extraction des sucres à froid par rapport à une norme CIRAD d'extraction à chaud donne des résultats satisfaisants sur la pulpe de mangue. Elle permet une mise en œuvre simplifiée et plus rapide. Cette méthodologie intégrée dans un protocole sera utilisée lors des prochaines saisons de récolte.

La croissance implique une augmentation du poids et de la teneur en matière sèche du fruit. La pulpe s'enrichit en sucres (amidon, saccharose et fructose principalement), et son acidité diminue au cours du développement.

En comparant la composition biochimique des mangues au cours du développement en fonction des traitements (ratio feuilles/fruit et irrigation), les résultats suivants ont été obtenus:

- ✓ Les fruits bénéficiant d'une disponibilité supérieure en assimilats carbonés sont plus lourds et moins acides, accumulent plus de saccharose, d'amidon, et de cations mobiles (potassium et magnésium).
- ✓ L'irrigation ne semble pas avoir un effet significatif sur la composition biochimique du fruit au cours de son développement.
- ✓ Les teneurs en acides organiques ne sont pas modifiés par les contraintes culturales; à priori le cycle de Krebs n'est pas perturbé.

L'évolution des fruits en maturation met en évidence l'impact des contraintes culturales, quand elles sont cumulées (faible ratio feuilles/fruit sans irrigation) sur:

- ✓ Le métabolisme des acides organiques n'est pas modifié par ces traitements, mais le pH des fruits stressés reste plus acide.
- ✓ Le métabolisme des sucres mis en œuvre lors de la maturation est fortement modifié.
- ✓ La synthèse d'ACC libre est perturbée dans ces fruits (pas de conversion apparente en éthylène).

Le potentiel de maturation des mangues est donc défini par les conditions de culture au cours de leur croissance.

Cette première phase d'étude a porté sur la caractérisation directe et destructive des fruits récoltés, d'un stade vert à un stade mûr sur le plant. Dans la pratique, les fruits sont récoltés encore verts afin de disposer d'un délai suffisant pour la mise en marché.

C'est pourquoi les travaux à venir porteront sur l'évolution en conservation de la mangue, pour un stade de récolté donné. En tenant compte des potentiels de maturation dictés par les conditions culturales, ces travaux permettront d'étudier les relations sur la qualité initiale des fruits verts à la récolte et leur qualité finale à la consommation, selon l'itinéraire post-récolte appliqué.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Fréhaut Gabrielle, Caractérisation biochimique de la mangue en fonction de son stade de maturité. 2001, Rapport non publié.

Gopalan, C., Ramasastri, B. V., and Balasubramanian, S. C. Nutritive value of indian food. Hyderabad : Nat.Instr. Nutr., Indian coun. Med. Res., 1971.

Heller, R. Physiologie végétale tome 1 : nutrition. 4^e éd. Paris : Masson, 1993, 294p.

Heller, R. Physiologie végétale tome 2: développement. 4^e éd. Paris: Masson, 1993, 266p.

Kalra S.K. Tandon D.K. Ripening behaviour of "Dashehari" mangi in relation to harvest period. Elsevier Science Publishers. 1993, pp. 263-269.

Krishnamurthy Shanta and Subramanyam H. Respiratory climacteric and chemical changes in mango fruit *Mangifera indica* L. J. Amer. Soc. Hort. Sci 95(3). 1970, pp. 333-337.

Krishnamurthy Shanta, Patwardhan M.V. and Subramanyam H. Biochemical changes during ripening of the mango fruit. Phytochemistry, vol. 10. 1971, pp. 2577-2581.

Lakshminarayana, S., Mango. in **Nagy, S., and Shaw, P. E.** Tropical and subtropical fruits. the AVI publishing company inc., 1980, pp. 184-257.

Lakshminarayana, S., Subbiah Shetty, M., and Subramanyam, H. Some aspects of developmental physiology of mango fruit. *Journal of Horticultural Science*. 1970, No.45, pp.133-142.

Laskaridou-Monnerville, A. *Etude des minéraux, vitamines et autres substances biologiques dans les fruits et légumes réunionnais par électrophorèse capillaire*. Thèse de doctorat : biochimie et biologie moléculaire : Saint Denis, université de la Réunion : 1997.

Latché et al. Biosynthèse et mode d'action de l'hormone végétal éthylène. *Fruits*, vol 50. 1995, pp. 379-396.

Lechaudel, M. croissance et qualité organoleptique du fruit chez le manguier : analyse expérimentale et modélisation de la disponibilité carbonée et hydrique. *non publié*, projet de thèse CIRAD-INRA, 2001.

Leley V.K., Narayana N. and Daji J.A. Biochemical studies in the growth and ripening of the "Alphonse" mango. *The indian journal of agricultural science*. 1942, pp. 291-299.

Lelievre J.M. et al. Ethylene and fruit ripening. *Physiologia Plantarum* 101. 1997, pp. 727-739.

Malundo T.M.M., Shewfelt R.L., Ware G.O. and Baldwin E.A. Sugars and acids influence flavor properties of mango (*Mangifera indica*). *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 126(1). 2001, pp. 115-121.

- Medlicott Andrew P. and Thompson Anthony K.** Analysis of sugars and organic acids in ripening mango fruits (*Mangifera indica* L. var Keitt) by high performance liquid chromatography. *J. Sci. Food. Food Agric* n°36. 1985, pp. 561-566.
- Mendoza JR D.B. and Wills R.B.H.** Mango: Fruit development, postharvest physiology and marketing in ASEAN. Asean Food Handling Bureau. 1984, 73p.
- Mitcham Elizabeth J. and McDonald Roy E.** Cell wall modification during ripening of "Keitt" and "Tommy Atkins" mango fruit. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 117(6). 1992, pp. 919-924.
- Mitra Sisir** Postharvest physiology and storage of tropical and subtropical fruits. CAB International. 1997, pp. 85-122.
- Mukerjee P.K.** biochemical and physiological studies during development of mango fruit. Horticultural Research Institute. 1959, pp. 95-101.
- Reddy Y.T.N.** Effect of leaf area and number on fruit development in different varieties of mango. *Journal of Mahasashtra Agricultural Universities*, 21(1). 1996, pp. 17-19.
- Salunkhe, D. K., Bolin, H. R., Reddy, N. R.** Storage, processing and nutritional quality of fruits and vegetables, Volume I : fresh fruits and vegetables. 2nd ed. Boca Raton : CRC Press, 1991, 323p.
- Sarker S.C. and Mushi A.A.A.** A study on the content and interconversion of organic acids of mango (*Mangifera indica* LIN) at various stage of fruit development. *Bangladesh Journal of Agricultural Science* 8(1). 1981, pp. 69-75.
- Shashirekha, M. S., and Patwardhan, M. V.** Changes in aminoacids, sugars and nonvolatile organic acids in a ripening mango fruit (*Mangifera Indica* : Badami variety). *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie*. 1976, No.9, pp.369-370.
- Simmons, S. L., Hofman, P. J., Whiley, A.W., and Hetherington, S.** Effect of leaf :fruit ratios on fruit growth, mineral concentration and quality of mango (*mangifera indica* L. cv. Kensington Pride). *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*. 1998, No. 73, Vol.3, pp. 367-374.
- Singh, B. N., Seshagiri, P. V. V., and Gupta, S. S.** Ontogenetic drifts in the physiology and chemistry of tropical fruits under orchards conditions. *Indian Journal of Agronomy and Science*. 1937, No.7, p.176.
- Souty, M., Génard, M., Reich, M., et Albagnac, G.** Influence de la fourniture en assimilats sur la maturation et la qualité de la pêche (*Prunus persica* L. 'Suncrest'). *Canadian Journal of Plant Science*. 1999, No.79, pp.259-268.
- Takuji Ito, Katsuaki Sasaki, and Yasuji Yoshida.** Changes in respiration rate, saccharide and organic acid content during ripening of mango fruit (*Mangifera Indica* L. 'Irwin') cultured in a plastic house. *J. Japan.Soc.Hort. Sci.*, 1997, No 66, Vol.3-4, pp.629-635.
- Trionthi, C.** Description et clé d'identification de quelques fruits tropicaux comestibles. *Fruits*. 1992, No.2, Vol.47, pp.331-348.

Annexes

Annexe n°1: Analyses statistiques

Annexe n°2: Pluviométrie

ANNEXE N°1 : TESTS STATISTIQUES

ANALYSE DE VARIANCE (Anavar)

3 EFFET DU STRESS HYDRIQUE SUR LA TENEUR EN MATIERE SECHE

ANAVAR:

10 feuilles	Degré de liberté	Somme des carrés des écarts	variance	F	Pr(F)	Effet
Eau	1	18.371	18.37	1.440	0.233	NS
résidu	89	1135.082	12.75			

100 feuilles	Degré de liberté	Somme des carrés des écarts	variance	F	Pr(F)	Effet
Eau	1	7.812	7.811	0.444	0.507	NS
résidu	89	1567.10	17.61			

4 EFFET DE LA CHARGE EN FRUITS SUR LA COMPOSITION BIOCHIMIQUE DE LA PULPE DE MANGUE

5 Malate

ANAVAR:

	Degré de liberté	Somme des carrés des écarts	variance	F	Pr(F)	Effet
Charge	1	109806	109805.6	3.4917	0.06329	NS
résidu	180	5660434	31446.9			

6 Citrate

ANAVAR:

	Degré de liberté	Somme des carrés des écarts	variance	F	Pr(F)	Effet
Charge	1	379642	379641.7	0.9133	0.341	NS
résidu	180	74822076	415678.2			

7 Potassium

ANAVAR:

	Degré de liberté	Somme des carrés des écarts	variance	F	Pr(F)	Effet
Charge	1	1628522	1628522	18.199	0.000032	S
résidu	180	16107307	89485			

8 Magnésium

ANAVAR:

	Degré de liberté	Somme des carrés des écarts	variance	F	Pr(F)	Effet
Charge	1	4385.98	4385.98	8.51	0.00397	S
résidu	180	92720.26	515.113			

9 Calcium

ANAVAR:

	Degré de liberté	Somme des carrés des écarts	variance	F	Pr(F)	Effet
Charge	1	147.7	147.74	0.179	0.672	NS
résidu	180	148222.3	823.46			

10 Glucose

ANAVAR:

	Degré de liberté	Somme des carrés des écarts	variance	F	Pr(F)	Effet
Charge	1	31562	31562	0.5966	0.44	NS
résidu	180	9522639	52903			

11 Fructose

ANAVAR:

	Degré de liberté	Somme des carrés des écarts	variance	F	Pr(F)	Effet
Charge	1	571292	571292	2.311	0.13	NS
résidu	180	44487600	247153.3			

12 Saccharose

ANAVAR:

	Degré de liberté	Somme des carrés des écarts	variance	F	Pr(F)	Effet
Charge	1	36804485	36804485	5.948	0.0157	S
résidu	180	1113700024	6187222			

13 Amidon

ANAVAR:

	Degré de liberté	Somme des carrés des écarts	variance	F	Pr(F)	Effet
Charge	1	3476606	3476606	0.596	0.441	NS
résidu	180	1020197683	5829701			

14 EFFET DE LA CHARGE EN FRUITS SUR DES CRITERES DE QUALITE

15 Teneur en matière sèche

ANAVAR:

	Degré de liberté	Somme des carrés des écarts	variance	F	Pr(F)	Effet
Charge	1	280.969	280.969	18.536	0.0000273	S
résidu	180	2728.365	15.158			

16 TSS

ANAVAR:

	Degré de liberté	Somme des carrés des écarts	variance	F	Pr(F)	Effet
Charge	1	87.189	87.189	4.67017	0.0321	S
résidu	180	3229.781	18.669			

17 Acidité titrable

ANAVAR:

	Degré de liberté	Somme des carrés des écarts	Variance	F	Pr(F)	Effet
Charge	1	88	88	0.576	0.449	NS
résidu	180	26122.46	152.76			

18 pH

ANAVAR:

	Degré de liberté	Somme des carrés des écarts	Variance	F	Pr(F)	Effet
Charge	1	0.391	0.391	2.237	0.137	NS
résidu	180	29.91	0.175			

19 EFFET DE LA CHARGE EN FRUIT ET EN EAU (3 DERNIERES SEMAINES DE PRELEVEMENT)

20 Amidon

ANAVAR:

	Degré de liberté	Somme des carrés des écarts	Variance	F	Pr(F)	Effet
traitements	3	52699888	17566629	2.735	0.052	S
résidu	58	372567208	6423573			

21 Saccharose

ANAVAR:

	Degré de liberté	Somme des carrés des écarts	Variance	F	Pr(F)	Effet
traitements	3	66978196	22326065	3.41	0.023	S
résidu	58	379759721	6547581			

22 pH

ANAVAR:

	Degré de liberté	Somme des carrés des écarts	Variance	F	Pr(F)	Effet
traitements	3	1.709	0.569	3.542	0.0199	S
résidu	58	9.329	0.161			

23 Malate

ANAVAR:

	Degré de liberté	Somme des carrés des écarts	Variance	F	Pr(F)	Effet
traitements	3	4130.3	1376.77	0.102	0.958	NS
résidu	58	78095.9	13463.9			

24 Citrate

ANAVAR:

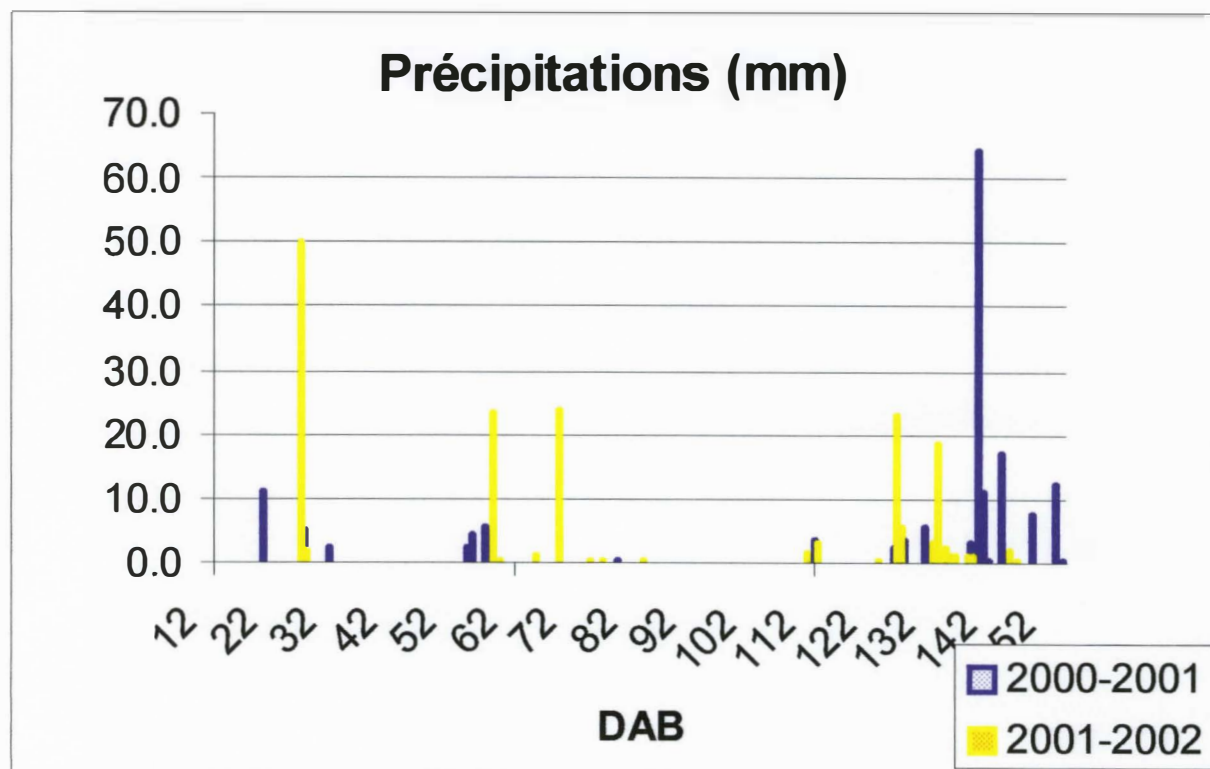
	Degré de liberté	Somme des carrés des écarts	Variance	F	Pr(F)	Effet
traitements	3	157512	52504.1	0.265	0.850	NS
résidu	58	11474032	197828.1			

25 Calcium

ANAVAR:

	Degré de liberté	Somme des carrés des écarts	Variance	F	Pr(F)	Effet
traitements	3	2172.32	724.107	1.061	0.3727	NS
résidu	58	39581.41	682.438			

ANNEXE N°2: PLUVIOMETRIE RELEVÉE



DAB: jours après la floraison

Pleine floraison : 20 août

Début nouaison : 1 septembre (DAB = 12)

Début stress hydrique : 21 septembre (DAB = 32)
